

Université de Montréal

**Hémisphères cérébraux et traitement phonologique
et sémantique des mots isolés**

par

Nathalie WALTER

Faculté de médecine

Thèse présentée à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de
Philosophiæ Doctor (Ph.D.)
en sciences biomédicales

Juillet 2004

©Nathalie Walter, 2004

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Cette thèse intitulée:

**Hémisphères cérébraux et traitement phonologique
et sémantique des mots isolés**

présentée par

Nathalie WALTER

a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes:

Jacques MONTPLAISIR

Président - rapporteur

Yves JOANETTE

Directeur de recherche

Mario BEAUREGARD

Codirecteur de recherche

Gonia JAREMA

Membre du jury

Dominique CARDEBAT

Examineur externe

Maryse LASSONDE

Représentant du doyen de la FES

Thèse acceptée le: **16 septembre 2004**

*À vous qui faites partie de mes familles,
celle du sang et celle du cœur...*

Remerciements

Quand une thèse dure longtemps, il y a davantage de monde à remercier! Comme je considère que le doctorat est aussi bien une "tranche de vie" très prenante qu'une expérience scientifiquement passionnante, je ne manquerai pas l'occasion qui m'est offerte ici d'adresser mes plus sincères remerciements:

A **Yves Joanette**, mon directeur de thèse. Sans lui, rien n'aurait été possible. Grâce à ce directeur "hors normes", j'ai non seulement appris ce qu'était la recherche en termes scientifiques, mais aussi en termes de gestion, de politique, de relations humaines, etc. Il m'a permis de m'initier à toutes sortes de domaines connexes à la recherche ainsi qu'à l'enseignement. Et surtout, il a su être à mes côtés dans tous les moments forts, bons ou mauvais, de cette "aventure"... Rien que pour ça, je ne l'en remercierai jamais assez!

A **Mario Beauregard**, mon codirecteur de thèse. Quelle tâche ingrate que celle de codirecteur! Pourtant, c'est avec lui que j'ai eu des conversations très animées sur l'impact de l'imagerie fonctionnelle ou encore sur les avantages et les limites de ces études si modernes. Merci aussi pour les grandes discussions sur la croissance personnelle, la nourriture végétarienne, la notion d'exploration du monde environnant et tout ce qui touche aux émotions dans le monde de la science...

A toutes les personnes dont je dois ici taire le nom puisqu'elles ont accepté de devenir mes "sujets" dans différentes études. Sans elles, il n'y aurait rien du tout dans les pages suivantes!

A **Marianne Corre**, la documentaliste du Centre de recherche, pour son aide et son soutien logistique en matière de publications, en version papier ou électronique. Merci surtout à l'amie et parfois la confidente, pour son attention et son affection jamais démenties... même de l'autre côté de l'Atlantique!

A **Hugo Dilhuydy**, le maître de cérémonie de la page Web du Centre de recherche, le président à vie de l'association des joueurs de tarot, l'expert en traitement d'images comme en sports de glisse, l'ami discret mais toujours présent.

A **André Gamache**, pour son calme et son humour dans les moments les plus critiques de ma vie d'étudiante (les présentations orales), mais aussi pour avoir

partagé avec moi les ficelles de la présentation en multimédia. A **Francine Giroux**, pour ses précieux conseils statistiques mais aussi pour ses nombreuses tentatives de conditionnement au jardinage en sous-sol. A **Marc Filaréto**, **Johane Landry** et **Isabelle Simoneau**, **Dominic Beaulieu** et **Marcelo Sequeira**, pour leur soutien et leur grande patience face à mes attentes "informatiques" et à mes accès de rage contre les ordinateurs ou autres machines affiliées.

A **Johanne Dupuis**, qui a su m'écouter, toujours avec attention et souvent avec humour, et régler tout en souplesse de nombreux problèmes, grands et petits. A **Raymonde Thibault**, qui a parfois "espionné" Yves à son insu pour me permettre de me faufiler entre deux rendez-vous très officiellement inscrits à l'agenda directorial. A **Cathy Desmarais**, qui m'a aidée dans la gestion du sous-sol étudiantin, mais qui a surtout partagé avec moi quelques cours d'aérobic pas très sérieux et le goût du soleil dans les îles de l'arc antillais.

A **Colette Cerny**, pour son grand sens de l'organisation et sa ténacité à tenir à jour les dossiers étudiants en dépit de tous nos oublis, égarements et autres distractions, comme pour sa présence tranquille tout au long de ces années.

A l'équipe de technologues de l'hôpital Notre-Dame du CHUM, pour leur patience et leur accueil lors de l'acquisition des images en IRMf, ainsi qu'à **Jean-Maxime Leroux** et **Boualem Mensour**, pour leur collaboration dans le traitement des images.

A **Laura Monetta**, mon Argentine enflammée, avec qui j'ai débattu de bien plus de questions existentielles que scientifiques, partagé bien des opinions et des soucis d'immigrantes... ainsi que de grandes joies, dont l'arrivée de Nicolas!

A celles et ceux qui m'ont accompagnée durant toutes ces années: **Louis Bherer**, **Maud Champagne**, **Stéphanie Cliche**, **Anh Duong**, **Karen Eck**, **Frédérique Gardye**, **David Gold**, **Fanny Guérin**, **Louise Guertin**, **Caroline Hamel**, **Odette Huot**, **Sven Joubert**, **Pascale Malenfant**, **Beatriz Mejia**, **Marie-Catherine St-Pierre**, **Tania Tremblay**, **Natacha Trudeau**, **Catherine Vanhalle** et les autres...

A **Ana Inés Ansaldo**, qui rougirait si j'écrivais ici tout le bien que je pense d'elle. De toute façon, elle sait à quel point elle compte pour moi... A **Victoria**, sa fille, ma presque-petite-sœur que j'aime tant voir grandir, l'adolescente rebelle aux maths, qui devient une jeune femme épanouie et qui a toute ma tendresse.

A **Anne Simard**, mon ex-coloc' et toujours amie, pour son incroyable faculté à être aussi importante, à son corps défendant... Malgré la distance géographique qui nous sépare, elle reste de ma famille au Québec! A **Arlette Pilote**, sa mère, que j'ai adoptée et avec qui je me sens toujours très à l'aise en dépit d'un vouvoiement tenace. A elles deux, pour leur grande tendresse et leur affection, toujours d'actualité depuis toutes ces années et qui me sont si précieuses.

A **Mauricette Vico**, pour nos grandes discussions sur les réalités de la vie, nos sorties cinéma et nos visites aux restaurants, nos fou-rires dans les autobus...

A **Delphine Bourdère Andréou**, apparue sur le tard, grâce au tai-chi, dans ma constellation québécoise. Elle est celle avec qui la découverte du Québec et de ses mœurs devient un véritable plaisir! A **Nadine Ganier & Patrick Delrieu** et leur fille, pour les moments de tendresse et d'affection ainsi que pour les clins d'œil complices et les éclats de rire qui émaillent nos rencontres... Dans la même veine, à **Brigitte Stanké**, pour le partage des bons et des mauvais moments ainsi que pour les démarrages fulgurants qui restent un des meilleurs moments de nos vendredis soirs!

A **Laurence & Jean-Michel** et leurs fils, **Françoise**, sa mère et ses enfants, **Françoise & Mano** et leurs filles, **Danou & Mano**, mes ami(e)s "martiniquais", toujours présents dans mes pensées, que je ne vois hélas pas assez souvent et qui ont attendu le dépôt de ma thèse avec plus d'impatience encore que moi...

A **Pierre**, mon frère, qui s'est toujours préoccupé de mon parcours et qui n'est peut-être pas encore tout à fait convaincu du bonheur que m'ont apporté ces années d'études. A **Marie-Colette**, ma mère, qui a suivi pas à pas ma progression et m'a soutenue de tout son amour et de sa grande fierté. A **Robert**, mon père, qui ne sait pas toujours ce que je fais, ni pourquoi, mais qui me laisse aller mon chemin. Même si je ne vous le dis assez souvent, vous avez tous les trois tout mon amour et mon indéfectible affection.

Aux organismes qui m'ont soutenue financièrement durant toutes ces années de doctorat: le **Ministère de la recherche du gouvernement français**, le **GRENE** (groupe de recherche en neuropsychologie expérimentale), la **Fondation des maladies du cœur du Canada**, la **fondation J.A. de Sève** et l'**Université de Montréal**.

Sommaire

Dès le XIXe siècle, l'existence et/ou la nature de la contribution de chacun des deux hémisphères cérébraux aux différents aspects du langage sont sujets d'études. Les travaux regroupés dans cette thèse portent sur l'étude de deux pôles du traitement des mots, associant les réponses comportementales et la neuroimagerie fonctionnelle. L'exploration des substrats neurobiologiques sous-tendant le traitement phonologique et sémantique des mots isolés avait pour but de mieux comprendre la coopération interhémisphérique dans certaines composantes du langage.

Les participants à ces études étaient des jeunes femmes francophones, droitières et très scolarisées. Deux tâches leur étaient été proposées: un jugement d'appariement graphophonémique (traitement phonologique) et un jugement d'appartenance catégorielle (traitement sémantique). Dans chacun des cas, les stimuli étaient des mots français, présentés visuellement, de difficulté différente soit selon la transparence graphophonémique, soit selon la prototypicalité des mots. Les méthodes de champ visuel divisé et d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) ont servi à l'acquisition des données.

Après une mise en contexte (chapitre 1), le chapitre 2 rassemble les deux études qui ont permis de préciser les choix méthodologiques concernant les tâches et stimuli, notamment pour affirmer l'existence des effets de transparence et de prototypicalité des stimuli. Les résultats de l'étude 3 (chapitre 3), réalisée en champ visuel divisé, soulignent que l'hémisphère gauche (HG) est impliqué dans les deux types de traitement alors que l'hémisphère droit (HD) ne contribue qu'au traitement sémantique des mots. Le chapitre 4 (études 4 et 5) présente les résultats obtenus en IRMf. La tâche phonologique induisait l'activation de régions de l'HG alors que la tâche sémantique impliquait l'HG et l'HD, au niveau des régions frontales, temporales et cérébelleuses. Par ailleurs, les deux niveaux de difficulté des stimuli ont eu un effet sur les réponses comportementales enregistrées mais non sur les données d'activation cérébrale. Ainsi, il semble que chacun des hémisphères cérébraux dispose d'habiletés distinctes pour le traitement phonologique et/ou sémantique de mots isolés. La

convergence des résultats rapportés contribue à une meilleure compréhension des rôles respectifs des deux hémisphères cérébraux au traitement de la forme et du sens des mots et suggère leur fonctionnement en mode coopératif.

Mots-clés: langage, hémisphère gauche, hémisphère droit, champ visuel divisé, imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), traitement phonologique, traitement sémantique.

Summary

Ever since the nineteenth century, many studies have attempted to determine the existence and/or the nature of the two cerebral hemispheres' contribution to various aspects of language. The work in this thesis studies two aspects of word processing in the same participants, using behavioral data and functional neuroimaging. The exploration of the neurobiological correlates underlying the phonological and semantic processing of isolated words should lead to a better understanding of interhemispheric cooperation in distinct language components.

The participants were young French-speaking, right-handed and well-educated women. They had to perform two tasks: a grapheme-phoneme matching task for phonological processing and a category judgment task for semantic processing. In both tasks, the stimuli were visually presented French words with two levels of difficulty according to their graphophonemic transparency or semantic prototypicality. Divided visual field and functional magnetic resonance imaging (fMRI) methods were used for the data acquisition.

After a brief review of the literature (chapter 1), chapter 2 presents the two studies which were necessary to specify the methodological choices for both tasks and stimuli. More specifically, these studies allowed us to affirm the existence of the transparency and prototypicality effects. The results of study 3 (chapter 3), carried out in a divided visual field condition, highlight the left hemisphere's (LH) involvement in both phonological and semantic word processing, whereas the right hemisphere (RH) contributes only to semantic processing. Chapter 4 (studies 4 and 5) presents the fMRI results. The phonological task activated regions of the LH whereas the semantic task implicated both the LH and the RH, in the frontal, temporal and cerebellar regions. The different difficulty levels of the stimuli affected the behavioral data but not the fMRI data. Thus, it seems that both cerebral hemispheres have different abilities for the phonological and/or semantic processing of isolated words. The use of varied methods supports a better understanding of their contributions and their potential cooperation to process language.

Key-words: language, left hemisphere, right hemisphere, divided visual field, functional magnetic resonance imaging (fMRI), 'phonological processing, semantic processing.

Table des matières

Liste des tableaux	<i>xiii</i>
Liste des figures	<i>xiv</i>
Liste des abréviations	<i>xvi</i>
Liste des annexes	<i>xvii</i>
CHAPITRE 1 - INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2 - CHOIX MÉTHODOLOGIQUES	25
<i>ÉTUDE 1</i>	
Grapheme-phoneme processing of single words	26
Nathalie Walter, Stéphanie Cliche, Sven Joubert, Mario Beauregard & Yves Joanette	
<i>Brain and Cognition, 46, 295-299 (2001)</i>	
<i>ÉTUDE 2</i>	
Semantic single word processing in French: a study in divided visual hemifields	36
Nathalie Walter, Mario Beauregard & Yves Joanette	
<i>Brain and Language, 83, 179-1821 (2002)</i>	
CHAPITRE 3 - ÉTUDE COMPORTEMENTALE	41
<i>ÉTUDE 3</i>	
Contributions hémisphériques au traitement phonologique et sémantique de mots isolés	42
Nathalie Walter, Mario Beauregard & Yves Joanette	
<i>Revue de neuropsychologie, 13, 323-345 (2003)</i>	
CHAPITRE 4 - ÉTUDES EN IMAGERIE PAR RÉSONANCE MAGNÉTIQUE FONCTIONNELLE (IRMf)	66
<i>ÉTUDE 4</i>	
Phonological and semantic processing on single words: an fMRI study	67
Nathalie Walter, Mario Beauregard, Ana Inés Ansaldo & Yves Joanette (soumise)	

ÉTUDE 5	
More difficult does not necessarily mean more brain: fMRI correlates of distinct levels of difficulty for phonological and semantic processing of words in normal subjects	90
Nathalie Walter, Mario Beauregard, Pierre Bourgouin, Gilles Beaudoin & Yves Joanette <i>Brain and Language</i> , 65, 90-92 (1998)	
CHAPITRE 5 - DISCUSSION GÉNÉRALE	95
INDEX DES AUTEURS	113
RÉFÉRENCES	120
ANNEXES	132

Chapitre 1

INTRODUCTION

1. Les fondements historiques de l'inscription neurobiologique du langage	2
2. Hémisphère droit et traitement de la forme et du sens des mots isolés	6
2.a. Les soubassements neurobiologiques du traitement des mots	6
2.a ₁ . La problématique structure - fonction	7
2.a ₂ . La spécialisation fonctionnelle et la coopération hémisphérique	8
2.b. Les individus commissurotomisés	9
2.c. Les individus normaux	10
2.d. Les cérébrolésés droits	12
2.e. La neuroimagerie	13
3. Problématique, question générale et objectifs spécifiques	16
4. Éléments de méthodologie communs aux différentes études	18
4.a. La présentation en champ visuel divisé	19
4.b. L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf)	20

*"Maître cerveau, sur son homme perché
Tenait dans ses plis son mystère"*

Paul Valéry

Le cerveau est un organe complexe qui continue d'offrir ses mystères à l'exploration qu'en fait le monde scientifique. Pourtant, il n'a pas toujours eu cette place de choix qu'il occupe dorénavant. En effet, au temps de Toutankhamon, le cerveau était même si négligé qu'il était jeté lors de l'embaumement alors que le foie, les poumons et le cœur étaient conservés dans une urne placée auprès de la momie! Alors, en ce qui concerne le langage, quand donc le voile a-t-il été levé sur l'implication du cerveau?

1. Les fondements historiques de l'inscription neurobiologique du langage

Pendant longtemps, la pensée et l'âme trouvaient leur siège au niveau du cœur, confondues toutes deux dans la connaissance scientifique et les impératifs religieux. Pourtant, dès le V^e siècle avant Jésus-Christ, le cerveau était considéré par certains, comme Hippocrate, comme le support de l'âme, même si le cœur revendiquait cette situation. Il a néanmoins fallu attendre le XIX^e siècle pour que les fonctions cognitives soient associées strictement au cerveau entre autres grâce aux contributions neuroanatomiques importantes de Gall et Spurzheim (1810).

En 1825, Bouillaud affirme déjà que "les mouvements des organes de la parole sont régis par un centre cérébral spécial, distinct, indépendant", ce qui représente une nouveauté. C'est le début de la relation entre structure cérébrale et fonction cognitive, clairement exposée et reposant sur des observations cliniques de patients. Par ailleurs, il souligne que "ce centre cérébral occupe les lobules antérieurs", soit les lobes frontaux (Bouillaud, 1825). Dans cette déclaration, Bouillaud soutient la position de Franz Gall, un anatomiste de la fin du XVIII^e siècle, qui est le premier à affirmer que le cerveau n'est pas une masse informe et que les facultés mentales peuvent y être localisées dans des régions différentes. Malheureusement, Gall développe aussi la phrénologie, science qui permet d'étudier les caractéristiques mentales et émotionnelles d'un individu par l'analyse minutieuse des bosses de son crâne (Gall et

Spurzheim, 1810). Cet excès conduira la communauté scientifique de l'époque à déconsidérer les travaux de Gall alors qu'il reste celui qui a associé pour la première fois certaines structures cérébrales et le langage articulé.

Les assertions de Gall et de Bouillaud quant à la localisation de fonctions langagières restent donc lettre morte jusqu'à la communication historique de Broca, en 1861. Le lien est dès lors établi entre le langage et le cerveau, mais il faut attendre encore quelques années pour qu'apparaisse la notion de latéralisation à gauche des centres du langage articulé (Broca, 1863). Malgré tout, un autre médecin avait déjà souligné le rôle de l'hémisphère gauche. En effet, Marc Dax peut être considéré comme le premier ayant localisé la parole dans l'hémisphère gauche puisqu'il a souligné en 1836 la coexistence d'une hémiplegie droite avec la perte du langage (Dax, lu en 1836, publié en 1865). Cependant, les observations de Dax n'étaient peut-être pas assez bien documentées et la communauté scientifique de l'époque n'a pas considéré ses travaux comme révolutionnaires. Néanmoins, la relation était dorénavant clairement établie entre la structure cérébrale et la fonction qu'elle sous-tend.

Les travaux de Broca (1861) ont été suivis peu de temps après par d'autres observations cliniques conduisant à l'identification de nouvelles régions cérébrales impliquées dans le langage. Ainsi, en 1874, dans la lignée des études lésionnelles de son contemporain Broca, Karl Wernicke a relié la compréhension des mots à l'intégrité de la partie postérieure du cortex temporal supérieur, toujours dans l'hémisphère gauche. A la fin du XIX^e siècle, les deux versants du langage, expressif et perceptif, ont donc trouvé leur localisation dans le tissu cérébral gauche. Toujours en s'appuyant sur des études lésionnelles, Lichtheim (1885) a été le premier à parler de l'aphasie de conduction qui survient à la suite d'une lésion du faisceau arqué, structure anatomique qui relie les aires de Broca (expression) et de Wernicke (perception).

Considérant le modèle proposé par Lichtheim (1885; voir figure 1), il apparaît que le traitement de la forme des mots (traitement phonologique) comprend leurs représentations auditive et motrice, alors que le traitement du sens des mots (traitement sémantique) est entièrement représenté par le centre des concepts. Toutes ces composantes sont évidemment conçues comme étant localisées au niveau du seul

hémisphère gauche. Ainsi, dans les conceptions du XIX^e siècle, l'hémisphère droit n'a strictement aucun rôle à jouer dans le traitement lexico-sémantique des mots. Il faudra attendre la seconde moitié du XX^e siècle pour voir cette situation changer.

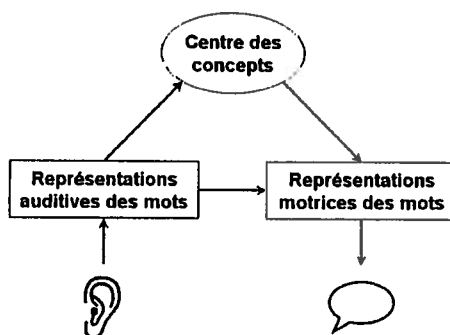


Figure 1. Les composantes cognitives du modèle neurologique du langage selon Lichtheim (1885) [adapté de Price, 2000].

Pendant que nombre de médecins et scientifiques s'ingénient à localiser, au niveau du tissu cérébral, toutes les fonctions cognitives en général et le langage en particulier, un courant en opposition se développe. Un des chefs de file de ce mouvement alternatif est John Hughlings-Jackson (1835-1911) pour qui la conception anatomo-fonctionnelle du système nerveux prend ses racines dans une tentative d'interprétation physiopathologique des troubles neurologiques et mentaux (Hughlings-Jackson, 1884). Ces conceptions de Hughlings-Jackson, rapportées entre autres par Taylor *et al.* (1932), peuvent se résumer à quatre idées puissantes: (1) l'évolution des fonctions nerveuses, notion qui introduit le facteur temps dans l'espace du système nerveux et dans l'organisation de ses fonctions, (2) la hiérarchie des formes, c'est-à-dire une direction dans l'organisation, découlant de l'introduction du temps, (3) la dissolution, par opposition à l'évolution du système nerveux, qui explique l'apparition de symptômes négatifs et positifs¹, et (4) la distinction entre deux types de dissolution, découlant de l'organisation hiérarchique en niveau d'intégration, à savoir la dissolution locale (pour les fonctions d'un niveau plus automatique) et la dissolution uniforme ou globale (pour les niveaux supérieurs d'intégration, davantage

¹ "L'atteinte a des effets négatifs, elle supprime une capacité ou entraîne un désordre fonctionnel reflétant les capacités intégrées par les structures atteintes, c'est-à-dire un niveau d'intégration. Elle a aussi des effets positifs qui témoignent de l'activité sous-jacente, libérée, correspondant au niveau fonctionnel atteint ou aux ensembles restés sains reliés à la région lésée" (Le Moal *et al.*, 1994).

volontaires). Ainsi, dans ce type d'organisation jacksonnienne, le traitement phonologique des mots se placerait à un niveau hiérarchique plus bas donc plus automatique, alors que le traitement sémantique relèverait davantage de niveaux supérieurs plus volontaires. Ces différentes composantes phonologique et sémantique se retrouvent également dans certains modèles connexionnistes contemporains, tel que le modèle adapté de Seidenberg et de McClelland (1989, voir figure 2). Ressemblant fortement au modèle proposé par Lichtheim (1885), cette nouvelle approche fait intervenir des inter-relations entre les différents "centres"² du traitement de mots, où les éléments phonologique et orthographique semblent occuper une place initiale (primaire, inférieure), donnant par la suite accès au niveau sémantique. Il faut noter cependant qu'une telle organisation "semi-hiérarchique" permet d'accéder à la forme phonologique des mots par l'intermédiaire de liens directs avec leur orthographe (O-P) ou de liens indirects par la sémantique (O-S, S-P).

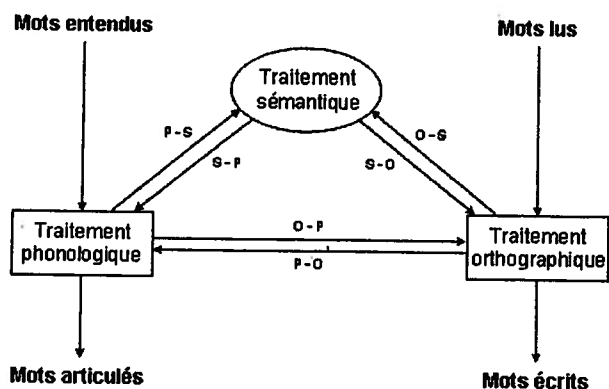


Figure 2. Modèle connexionniste du traitement des mots (Seidenberg et McClelland, 1989).

Les fondements historiques de l'étude du langage montrent bien que l'inscription neurobiologique des composantes langagières reste difficile selon le courant de pensée sur lequel elle s'appuie. Néanmoins, un fait demeure constant jusqu'au début des années soixante: le langage est présenté comme l'apanage de l'hémisphère cérébral gauche, sans qu'il ne soit jamais vraiment question de l'implication de son homologue droit. Ainsi, l'hémisphère gauche est capable de traiter les mots selon leur

² Cette notion de "centre" de traitement des mots n'est pas sans rappeler le système central proposé par Fodor (1983). Il ne faut cependant pas voir là une communion de pensée avec le modularisme car un "centre" peut être sous-tendu par des régions cérébrales connexes, proches ou éloignées.

forme et leur sens, quelles que soient leurs caractéristiques, tandis que les habiletés de l'hémisphère droit sont substantiellement distinctes, puisqu'il semble n'être capable de traiter que les mots fréquents, imageables et/ou concrets, ainsi que certaines relations sémantiques.

2. Hémisphère droit et traitement de la forme et du sens des mots isolés

Les premiers travaux en neuropsychologie du langage démontrent bien que l'implication de l'hémisphère gauche du droitier dans les processus langagiers est majeure. Qu'en est-il cependant de l'hémisphère droit et de son habileté à participer au traitement des mots? Différentes études ont permis de faire la lumière sur la contribution de chacun des deux hémisphères cérébraux à ce traitement. Elles font appel à des individus atteints d'une lésion cérébrale ou encore à des individus indemnes sur le plan neurologique. L'ensemble des observations ainsi rapportées a conduit à mettre en lumière le substrat neurobiologique des fonctions langagières, relatif à la participation potentielle ou effective des hémisphères cérébraux. Ces faits seront ici résumés, après une brève discussion de la nature même des liens entre structure et fonction / cognition.

2.a. Les soubassements neurobiologiques du traitement des mots

Les observations obtenues auprès de différents types d'individus, cérébrólésés ou non, permettent de mieux comprendre les habiletés langagières propres à chacun des deux hémisphères cérébraux ou, tout au moins, conduisent à l'identification des caractéristiques que doivent présenter les stimuli verbaux pour être traités de manière efficace. La meilleure connaissance des habiletés langagières conduit naturellement à s'interroger sur les soubassements neurobiologiques de ces fonctions de traitement des mots qu'exercent aussi bien l'hémisphère droit que son homologue gauche.

"Une fonction se rapporte à un ensemble de propriétés actives et dynamiques concourant chez un être vivant vers un même but. Elle implique complexité, globalité, universalité, équilibre (milieu intérieur, homéostasie) et contribue à la survie de l'individu et de son espèce."

Le Moal *et al.* (1994)

Selon cette définition de ce qu'est une fonction, il est assez aisé de comprendre la relation entre un organe comme les poumons et les mécanismes respiratoires qu'ils assument. La physiologie a confirmé la contribution de systèmes à diverses activités fonctionnelles. L'étude du cerveau comme organe peut s'aborder par l'anatomie, ce qui permet d'accéder à des informations qui vont du niveau macrostructural (lobes, sillons, etc.) à microstructural (cellules, molécules, etc.). Il devient alors fort complexe d'établir le lien entre la structure révélée par la neuroanatomie et les multiples fonctions cérébrales observées alors même que les différents types de cellules neuronales et/ou de neurotransmetteurs ne sont pas assez nombreux pour expliquer directement la diversité des comportements, au sens le plus large, qui sont supportés par le cerveau. Le vocabulaire utilisé pour décrire cette relation entre structure et fonction révèle toute la complexité de cette problématique et ressemble à celui qui est employé pour décrire le fonctionnement d'une glande: une fonction est assumée, contrôlée, exprimée par la région qui la sous-tend. Pourtant, en dépit de la difficulté manifeste à établir des relations entre les structures et les fonctions, les avancées de la neuropsychologie ont permis de mieux comprendre les habiletés particulières de chacun des deux hémisphères cérébraux et l'expression de coopérations diverses, ainsi que les corrélats des fonctions langagières.

2.a1. La problématique structure - fonction

Deux conceptions, trouvant leur origine au XIX^e siècle, s'opposent relativement à cette problématique. D'une part, le localisationnisme défend la suprématie de la structure. La phrénologie de Gall et Spurzheim (1810) présente le cerveau comme une collection de régions dédiées chacune à une "faculté" définie. D'autre part, le mouvement antilocalisationniste supporte plutôt la thèse adverse en avançant que toutes les parties du cerveau participent à toutes les fonctions, en raison de l'équipotentialité des tissus cérébraux (Flourens, 1824). Les différentes découvertes ainsi que l'évolution des connaissances vont se définir par l'un ou l'autre de ces deux pôles au cours du XIX^e siècle et lors de la première moitié du XX^e siècle (e.g., Hughlings-Jackson, 1884; Kleist, 1934). De cette partition entre deux points de vue opposés émerge un autre courant de pensée, le connexionniste. Les travaux de Wernicke sur

l'aphasie de conduction pourraient en marquer l'origine. En effet, selon Wernicke (1908), des fonctions spécifiques sont sous-tendues par des groupes de neurones qui sont assemblés en ensembles anatomo-fonctionnels et reliés les uns aux autres par des faisceaux spécifiques de fibres nerveuses. Dès lors, la fonction peut se comprendre comme l'expression du fonctionnement intégré et interconnecté de sous-ensembles cérébraux distincts. Cette nouvelle idée permet d'accepter le concept de restauration fonctionnelle après lésion, car la récupération post-lésionnelle serait incompatible avec une conception purement localisationniste où chaque région est unique et strictement associée à une fonction déterminée.

2.a2. La spécialisation fonctionnelle et la coopération hémisphérique

Tout porte à croire que deux structures symétriques aussi bien sur le plan de leur morphologie que de leur organisation fonctionnelle, comme les yeux, les oreilles ou les poumons, doivent posséder les mêmes propriétés et servir les mêmes fonctions. C'est peut-être à cause de cette logique qu'il a fallu attendre la seconde moitié du XIX^e siècle pour comprendre que ce n'était pas le cas pour les hémisphères cérébraux qui ne sont pas fonctionnellement équivalents malgré leur configuration essentiellement identique³ (Sergent, 1994). Pourtant, de nombreux écrits rapportaient une atteinte sélective des fonctions cognitives suite à une lésion unilatérale. Dès lors, le développement de la compréhension entre les fonctions cognitives et les structures cérébrales ne pouvait qu'évoluer vers la nécessité d'une spécification des habiletés propres à chaque hémisphère cérébral. L'étude de la latéralisation fonctionnelle s'est alors concentrée sur la spécialisation des hémisphères dans le traitement des informations. La spécification du rôle de chaque hémisphère, c'est-à-dire de la nature de leur contribution à diverses fonctions cognitives, s'est inscrite dans une conception bipolaire unique (Sergent, 1994) qui doit être considérée comme dépassée. En fait, il existe une multitude de moyens par lesquels les deux hémisphères cérébraux peuvent contribuer à la réalisation d'une fonction et ce, de manière plus ou moins inégale. Par

³ Les deux hémisphères cérébraux ne sont pas strictement identiques du point de vue morphologique, comme en témoignent les asymétries du *planum temporale* ou celles de la forme et de l'orientation de la scissure de Sylvius par exemple (Geschwind et Levitsky, 1968; pour une revue, voir Habib, 1998).

exemple, deux aires cérébrales symétriques peuvent être équivalentes sur le plan fonctionnel et néanmoins contrôler des portions opposées du corps (e.g., aires motrices primaires), participer à la réalisation d'une même fonction de manière hiérarchique (e.g., catégorisation sémantique d'images d'objets présentés dans une perspective non canonique; Warrington et Taylor, 1978) ou encore contribuer simultanément à des composantes différentes et non équivalentes d'une même fonction (e.g., impact d'une lésion de l'aire de Broca et de son homologue droit sur l'expression verbale et la prosodie; Mesulam, 1990). Ces faits suggèrent donc bien que la notion d'asymétrie fonctionnelle n'est pas homogène et que la contribution de chaque hémisphère cérébral à la réalisation de fonctions cognitives diffère selon des critères qui sont multiples et variés.

2.b. Les individus commissurotomisés

Ce sont probablement les études menées auprès de patients commissurotomisés⁴ qui ont, les premières, mis en lumière la contribution de l'hémisphère droit au langage et notamment pour le traitement lexico-sémantique des mots (Gazzaniga, 1983; pour une revue, voir Gazzaniga, 2000). Une longue série de travaux (pour une revue, voir Code et Joannette, 2003) ont conduit Gazzaniga, en 1970, à concevoir que l'hémisphère droit, en dépit de compétences linguistiques toujours inférieures à celles de l'hémisphère gauche, était capable d'associations sémantiques et disposait des prérequis nécessaires à l'établissement d'une forme rudimentaire du langage. Ainsi, certaines habiletés étaient reconnues à l'hémisphère droit en ce qui concerne le traitement des mots, notamment sur le plan de leur signification. Zaidel (1983) avançait d'ailleurs que l'hémisphère droit disposait de systèmes phonologique et syntaxique faibles, d'aucun mécanisme phonétique mais d'un lexique sémantique riche. Dans l'ensemble, les études menées auprès de commissurotomisés suggèrent que l'activité de l'hémisphère droit⁵ sous-tend certains processus permettant le traitement sémantique des mots. De fait, elles tendent à démontrer que l'hémisphère

⁴ Dont les deux hémisphères cérébraux sont déconnectés par section chirurgicale des liaisons inter-hémisphériques, notamment le corps calleux.

⁵ Il faut comprendre qu'il s'agit de l'hémisphère droit de certains des patients qui ont pris part aux études rapportées ici et qu'il s'agit toujours de droitiers.

droit est capable d'associations intermodales (e.g., Sperry, 1968; Gazzaniga, 1970), de lire (e.g., Gazzaniga *et al.*, 1977; Sidtis *et al.*, 1981), de comprendre des mots présentés oralement (e.g., Zaidel, 1978; Gazzaniga *et al.*, 1984) et d'établir des liens sémantiques (e.g., Joannette *et al.*, 1990). Néanmoins, en dépit d'un indéniable potentiel sémantique, il semble que les performances lexico-sémantiques de l'hémisphère droit restent inférieures à celles de l'hémisphère gauche isolé. Par ailleurs, lorsque les deux hémisphères sont appelés simultanément à contribuer sur le plan lexico-sémantique, c'est la partie gauche du cerveau qui assume le plus souvent le contrôle de la réalisation de la tâche demandée (Gordon, 1980).

2.c. Les individus normaux

Les études menées auprès de commissurotomisés offrent diverses informations quant au potentiel de l'hémisphère droit à participer au traitement des mots. Toutefois, du fait même de la déconnexion calleuse, il faut envisager qu'une éventuelle réorganisation fonctionnelle chez ces individus a été la source d'un fonctionnement cérébral particulier. L'isolement relatif de chacun des deux hémisphères peut être reproduit chez des individus indemnes de lésion neurologique, par l'utilisation de méthodologie telle que la présentation de stimuli en champ visuel divisé (Faure, 2003) ou encore en écoute dichotique. Dès les années soixante-dix, différentes études menées auprès d'individus normaux soulignent la contribution de l'hémisphère droit à traiter les mots, tout au moins selon certaines de leurs caractéristiques lexico-sémantiques. Par exemple, Day (1977) a montré que le niveau de concrétude des mots influence leur traitement par l'un ou l'autre des hémisphères cérébraux. Dans une tâche de décision lexicale, l'auteur présentait en vision latéralisée des substantifs abstraits et concrets. Les noms concrets étaient alors reconnus comme étant des mots aussi rapidement dans l'un ou l'autre des hémichamps visuels. Par contre, un avantage du champ visuel droit est apparu lorsque les stimuli étaient des noms abstraits. Ces travaux montrent donc bien que l'hémisphère droit est capable de traiter les mots concrets (Day, 1977). Cette relation entre l'aspect concret de certains mots et la possibilité qu'ils ont d'être traités par l'hémisphère droit est restée jusqu'à aujourd'hui sujette à controverses. Pour préciser le potentiel hémisphérique droit, Hines (1976) a

fait intervenir la fréquence d'usage dans la langue et a montré alors que plus un mot est fréquent, mieux il est traité dans le champ visuel gauche donc par l'hémisphère droit. Sans rejeter cette variable de fréquence d'usage, Day (1979) s'est efforcé de montrer, toujours en utilisant une tâche de décision lexicale latéralisée, que le degré d'imageabilité⁶ des mots était une caractéristique déterminante pour leur traitement par l'hémisphère droit. Ses observations auprès d'un groupe de sujets normaux ont révélé que les stimuli (noms et adjectifs) peu imageables, ainsi que les verbes quel que soit leur niveau d'imageabilité, étaient plus rapidement reconnus lorsque présentés dans le champ visuel droit. L'auteur a proposé alors que la reconnaissance des mots dans l'hémisphère droit était facilitée par un code lexical basé sur l'imageabilité: les mots et les adjectifs les plus imageables peuvent être traités par cet hémisphère car ils sont intégrés dans son code lexical (Day, 1979). Par contre, les verbes sont traités de manière dominante voire exclusive par l'hémisphère gauche: soit ils ne s'insèrent pas dans le code lexical de l'hémisphère droit, soit ils n'ont pas de représentation directe par l'image. Ces travaux initiaux de Day (1977, 1979) et de Hines (1976) sur l'impact du niveau de concrétude, de fréquence et d'imageabilité des mots sur leur traitement par l'un et/ou l'autre des deux hémisphères cérébraux sont encore d'actualité. En effet, avec la technique de présentation latéralisée des stimuli, des études plus récentes ont répliqué les résultats obtenus en soulignant que l'avantage du champ visuel droit (et donc de l'hémisphère gauche) est significatif pour le traitement des noms abstraits et peu imageables, mais pas pour les mots concrets et imageables (Deloche *et al.*, 1987; Bub et Lewine, 1988; Chiarello *et al.*, 2001). L'hémisphère droit est donc capable de participer au traitement du langage, du moins pour ce qui est des mots qui présentent des caractéristiques lexico-sémantiques particulières, comme par exemple les substantifs ou les mots avec un degré d'imageabilité élevé.

⁶ Selon Paivio *et al.* (1968), un mot est dit imageable quand il évoque une expérience sensorielle sous la forme de représentations mentales.

2.d. Les cérébrolésés droits

À un moment où le concept de dominance cérébrale gauche pour le langage était omniprésent, d'autres faits suggéraient que l'hémisphère mineur, le droit, possédait lui aussi certaines habiletés spécifiques pour ce qui a trait à la communication verbale. Différents travaux et observations cliniques ont conduit à considérer le potentiel langagier de l'hémisphère droit mais ce sont les études menées auprès de patients cérébrolésés droits⁷ qui ont souligné la contribution effective de cet hémisphère au traitement lexico-sémantique des mots. De fait, depuis les premières descriptions de Eisenson (1962) et Critchley (1962), une littérature considérable a vu le jour sur le thème de la contribution de l'hémisphère droit du droitier à la communication verbale. Ainsi les difficultés des cérébrolésés droits sont bien connues quant aux habiletés discursives, à la compréhension et à l'expression de la prosodie, à la manipulation du contenu émotionnel dans le message verbal (pour une revue, voir Joannette *et al.*, 1990). Certains cérébrolésés droits ont démontré également des difficultés au niveau de la dénomination (Joannette et Goulet, 1988) et de l'évocation lexicale (Faure et Blanc-Garin, 1994), de la formulation abstraite des énoncés, de la compréhension des métaphores, de l'ironie et des actes de langage indirects (Champagne *et al.*, 2002), entre autres troubles de la communication verbale⁸. Un consensus acceptable est cependant loin d'être atteint concernant l'étiquette clinique des difficultés de communication des cérébrolésés droits par comparaison avec l'immense littérature appuyant les connaissances relatives aux lésions gauches et donc à l'aphasie (Joannette et Ansaldo, 2001). Néanmoins, certaines observations cliniques permettent de mettre en lumière le rôle effectif de l'hémisphère droit dans le traitement des mots, notamment pour ce qui a trait à leur sens. L'ensemble de travaux disponibles semble montrer que l'hémisphère droit n'est pas totalement dénué de potentiel langagier et que celui-ci a bien plus souvent trait au traitement du sens que de la forme du message verbal (Code, 1987). De manière générale, il apparaît que les difficultés que rencontrent les cérébrolésés droits pour le traitement sémantique des mots isolés, et

⁷ Patients droitiers, souffrant d'une destruction partielle ou complète de l'hémisphère droit, mais qui ne présentent pas le tableau exceptionnel de l'aphasie dite croisée (Joannette, 1989).

⁸ Les difficultés des cérébrolésés droits rapportés ici ne constituent que des exemples du tableau clinique présenté par ces patients. Pour une revue plus exhaustive, se reporter à Joannette *et al.* (1990).

en particulier des mots d'occurrence peu fréquente et de faible niveau de concrétude et d'imageabilité ou encore dont le sens second est de nature métaphorique (Gagnon *et al.*, 2003), témoignent de la combinaison complexe d'une diminution des ressources cognitives (Joanette et Goulet, 1998; Monetta et Joanette, 2003) et d'une atteinte plus spécifique qui caractériserait les lésions droites (Joanette *et al.*, 1988; Joanette *et al.*, 1990). Par exemple, dans une tâche d'évocation lexicale, les mots produits par les cérébrolésés droits seraient les moins prototypiques par rapport à la catégorie sémantique explorée, ce qui pourrait traduire une certaine tendance à activer des liens sémantiques plus périphériques par rapport à la catégorie sémantique utilisée (LeBlanc et Joanette, 1996). Cette caractéristique au niveau du traitement sémantique des mots isolés trouverait écho au plan du discours puisqu'il est souvent rapporté que les cérébrolésés droits ont également tendance à présenter un discours tangentiel qui dévie du thème de la conversation (Gardner *et al.*, 1983; Tompkins, 1995).

2.e. La neuroimagerie

Les habiletés de communication verbale résultent d'une interaction complexe entre les systèmes sensoriels d'entrée (auditif, visuel et tactile), les systèmes moteurs de sortie (articulation, écriture, signes, dessins) ainsi que d'un certain nombre de systèmes cognitifs impliquant entre autres la mémoire (phonologique, orthographique et sémantique). La connaissance de l'organisation du langage au niveau cérébral s'est longtemps appuyée sur l'approche du déficit lésionnel: la concordance d'une lésion cérébrale (transitoire ou permanente) et des signes cliniques observés permettait alors de déduire la pertinence de cette région dans l'architecture fonctionnelle du cerveau pour le langage (Bookheimer, 2002). Cette philosophie fondamentale a conduit les premiers neurologues vers une conception "modulaire" (Fodor, 1983) de l'organisation fonctionnelle du langage, selon laquelle des territoires déterminés du cortex sont considérés responsables de certaines fonctions langagières plus ou moins spécifiques. Poussant ce raisonnement à l'extrême, le système langagier pourrait alors se composer principalement de deux régions: l'aire de Broca, au niveau du cortex frontal inférieur pour la production langagière, et l'aire de Wernicke, au niveau de la

région temporele supéropostérieure pour la compréhension du langage. Cette vision parcellaire de l'organisation fonctionnelle s'amende sans contredit grâce à l'évolution technologique. En effet, l'émergence de nouvelles techniques de neuroimagerie fonctionnelle, et notamment celle de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), permet d'intégrer les modèles cognitifs du langage qui jalonnent la littérature des deux derniers siècles, avec les mécanismes neurobiologiques qui les sous-tendent. Comme l'a dit Posner (1993),

"le microscope et le télescope ouvrirent, en leur temps, de vastes domaines de découvertes scientifiques insoupçonnées. Maintenant que de nouvelles méthodes d'imagerie permettent de visualiser les systèmes cérébraux de la pensée normale et pathologique, la cognition humaine pourrait être à l'aube d'une opportunité similaire".

Les approches en neuroimagerie fonctionnelle ont permis des avancées tout à fait remarquables quant à l'identification du substrat neurobiologique du langage et en particulier celui qui sous-tend le traitement des mots. A cet égard, le traitement des mots sur le plan phonologique *versus* sémantique illustre bien les deux pôles du continuum allant de la forme au sens des mots, pôles qui semblent offrir les caractéristiques particulières pour l'exploration de la dynamique interhémisphérique. Les corrélats neuronaux du traitement phonologique ont été étudiés de manière très diversifiée (Poldrack *et al.*, 2001), allant du traitement des caractéristiques acoustiques du message verbal jusqu'aux représentations linguistiques, aussi bien sur des phonèmes isolés que sur des mots (pour une revue, voir Gernsbacher et Kaschak, 2003). C'est ainsi que de nombreuses études se sont intéressées aux mots entendus *versus* au silence (Fiez, 1996; Price *et al.*, 1996; Warburton *et al.*, 1996; Binder *et al.*, 1994; Mazoyer *et al.*, 1993; Petersen *et al.*, 1988), aux syllabes *versus* au bruit (Zatorre *et al.*, 1992), aux mots connus de la langue *versus* aux mots d'une langue étrangère inconnue (Schlosser *et al.*, 1998), ou encore à diverses tâches de traitement phonologique (Démonet *et al.*, 1992; Démonet *et al.*, 1994; Zatorre *et al.*, 1992; Zatorre *et al.*, 1996). Bien qu'il y ait, à travers tous ces travaux, une variabilité notable de la localisation précise des activations, il semble que les deux pôles langagiers précédemment cités (aires de Broca et de Wernicke) fonctionnent comme un réseau intégré dans la perception de la forme du langage. Par exemple, dans la comparaison

entre l'écoute de mots *versus* de bruits non verbaux (Mummery *et al.*, 1999), les aires cérébrales activées sont: les gyri temporaux supérieurs antérieur et postérieur, la surface dorsale du gyrus temporal supérieur (*planum temporale*), le sillon temporal supérieur et, plus ventralement, le gyrus temporal moyen. En somme, la perception de la parole active bilatéralement les cortex temporaux supérieurs et moyens tandis que l'expression orale implique le sillon temporal postéro-supérieur gauche, l'insula et le cortex temporal inférieur de l'hémisphère gauche, de même que les cortex sensorimoteurs gauche et droit.

Comme pour le versant phonologique, de nombreuses études se sont intéressées au traitement sémantique des mots isolés. Là aussi, à travers l'ensemble des études, les types de traitement sémantique et les stimuli utilisés sont extrêmement diversifiés. Une recension non exhaustive des écrits permet cependant d'établir que certaines régions cérébrales sont souvent citées comme étant activées lors du traitement de relations sémantiques pour les mots isolés. Le plus souvent, et sans trop de controverse, l'activation cérébrale se trouve située au niveau du cortex frontal inférieur gauche (Binder *et al.*, 1997; Demb *et al.*, 1995; Démonet *et al.*, 1992; Gabrieli *et al.*, 1996; Gold et Buckner, 2002; Kapur *et al.*, 1994; Ojemann *et al.*, 1998; Poldrack *et al.*, 1999), surtout une région antérieure et ventrale (BA -Brodmann Area- 47/10 approximativement), mais aussi le cervelet droit (Fiez, 1996; Raichle *et al.*, 1994) et le cortex temporal moyen (Raichle *et al.*, 1994; Vandenberghe *et al.*, 1996; Perani *et al.*, 1999). Si l'activation des régions frontales inférieures gauches est rapportée dans à peu près toutes les études sur le traitement sémantique, certains travaux soulignent également l'existence d'une activation similaire, quoique plus discrète, des régions homologues dans l'hémisphère droit (e.g., Vandenberghe *et al.*, 1996; Mummery *et al.*, 1999; Thompson-Schill *et al.*, 1999; Devlin *et al.*, 2000), ainsi qu'au niveau des gyri frontaux supérieurs gauche et droit (Cappa *et al.*, 1998; Pilgrim *et al.*, 2002). En résumé, les aires cérébrales activées significativement par un traitement sémantique sont les gyri frontaux inférieurs (BA47) gauche et droit, ainsi que les régions temporales gauches, inférieures (BA36 et 20) et moyennes (BA21).

3. Problématique, question générale et objectifs spécifiques

La littérature a démontré que la latéralisation fonctionnelle du cerveau ne dépend pas d'un principe explicatif unique (lien univoque entre structure et fonction) et que les relations interhémisphériques sont caractérisées par divers phénomènes multiples (e.g., fonctionnement équivalent, complémentaire, différent, hiérarchique). De fait, différentes études se sont intéressées à décrire le type de stimuli préférentiellement traités par l'un ou l'autre hémisphère, en s'appuyant notamment sur des résultats chronométriques en présentation latéralisée. D'autres travaux se sont attachés à identifier les aires cérébrales spécifiquement activées lors de différents types de traitement langagier, surtout au niveau du mot isolé. La convergence des observations montre bien un avantage incontesté de l'hémisphère gauche des sujets droitiers pour le traitement des mots, ainsi que des habiletés spécifiques de l'hémisphère droit dans certaines conditions. Si plusieurs études ont choisi d'explorer le traitement phonologique et/ou sémantique des mots isolés, aucune d'entre elles n'a étudié ces deux pôles du traitement des mots chez les mêmes individus, en associant à la fois les réponses comportementales et la neuroimagerie fonctionnelle. Le présent travail pose donc la question des substrats neurobiologiques qui sous-tendent le traitement de la forme des mots (traitement phonologique) *versus* de leur sens (traitement sémantique). Mieux comprendre la contribution de chacun des deux hémisphères cérébraux au traitement phonologique et sémantique des mots isolés devrait ainsi permettre de faire la lumière sur la nature de la coopération interhémisphérique dans certaines composantes du langage. De plus, afin de palier en partie les effets indésirables du paradigme de soustraction (Dehaene, 1997) couramment utilisé en neuroimagerie, le niveau de complexité des stimuli a été systématiquement varié pour les dimensions phonologique et sémantique du traitement des mots isolés. Pour répondre à la question posée, trois études ont été menées et sont décrites dans les chapitres suivants. Ainsi, dans le chapitre 2, deux études démontrent la pertinence du choix méthodologique de la transparence⁹ des stimuli pour le traitement phonologique et de la prototypicalité pour le traitement sémantique des mots. La

⁹ La *transparence* d'un stimulus réfère ici à la concordance entre phonème et graphème. Par exemple, le son /o/ en Français s'écrit aussi bien avec la lettre 'o' qu'avec le digramme 'au', entre autres.

première étude, *Grapheme-phoneme processing of single words* [2001, *Brain and Cognition*, 46, 295-299], explore l'impact de la manipulation de la complexité des stimuli dans deux tâches phonologiques, un jugement de rime et un appariement grapho-phonémique. La seconde étude de ce chapitre, *Semantic single word processing in French: a study in divided visual hemifields* [2002, *Brain and Language*, 83, 179-182], consiste à vérifier l'effet de la prototypicalité¹⁰ sur le traitement sémantique des mots. Le chapitre 3, soit l'étude intitulée *Contributions hémisphériques au traitement phonologique et sémantique de mots isolés* [2003, *Revue de neuropsychologie*, 13, 323-345], s'intéresse à la participation de chacun des deux hémisphères cérébraux au traitement de la forme (phonologie) par opposition au sens (sémantique) de mots isolés, lorsque les stimuli sont présentés en champ visuel divisé. Enfin, le chapitre 4 rassemble les études menées en IRMf. L'étude *More difficult does not necessarily mean more brain: fMRI correlates of distinct levels of difficulty for phonological and semantic processing of words in normal subjects* [1998, *Brain and Language*, 65, 90-92] souligne que l'activation cérébrale n'est pas différente lorsque le niveau de complexité des stimuli est manipulé, que ce soit dans le traitement phonologique ou sémantique de mots isolés. Ces résultats sont confirmés dans la dernière étude, *Phonological and semantic processing on single word: an fMRI study* (soumise), de même que les corrélats neuronaux sont précisés pour les deux types de traitement des mots. Le prochain paragraphe explicite les objectifs de chacune de ces études.

L'exploration du rôle de chacun des deux hémisphères cérébraux dans le traitement de la forme et/ou du sens des mots exige de s'assurer des choix méthodologiques. La première étude, *Grapheme-phoneme processing of single words* [2001, *Brain and Cognition*, 46, 295-299], a servi à déterminer quel type de tâche phonologique allait être utilisée par la suite pour explorer la contribution de chacun des deux hémisphères cérébraux au traitement phonologique des mots isolés. Il est apparu que l'appariement grapho-phonémique, i.e. décider si un mot présenté sous forme écrite contient ou non le son /o/, permettait de mettre en évidence un profil de réponses comportementales

¹⁰ La *prototypicalité* est une notion qui renvoie à la place d'un stimulus dans sa classe sémantique. Par exemple, le sapin est un stimulus plus prototypique que le peuplier dans la catégorie des arbres.

différentes selon le degré de transparence des stimuli. De même, l'étude *Semantic single word processing in French: a study in divided visual hemifields* [2002, *Brain and Language*, 83, 179-182] a permis de montrer que la prototypicalité sémantique des stimuli jouait un rôle déterminant sur le temps de réponse des sujets dans d'une tâche de jugement d'appartenance catégorielle. Ces deux études ont été menées en utilisant la méthode de présentation en champ visuel divisé, décrite ci-dessous. La seconde partie du travail, décrite dans l'étude *Contributions hémisphériques au traitement phonologique et sémantique de mots isolés* [2003, *Revue de neuropsychologie*, 13, 323-345], porte sur l'exploration des profils de réponse comportementale chez de jeunes sujets en santé qui effectuaient les deux types de traitement, phonologique et sémantique, des mots isolés. Les mêmes sujets ont donc procédé aux deux tâches proposées, à savoir un jugement d'appariement grapho-phonémique et un jugement d'appartenance catégorielle. Pour finir, deux études en imagerie fonctionnelle ont été menées de façon à identifier les aires cérébrales impliquées chez des sujets qui exécutaient les deux tâches, phonologique et sémantique. L'étude *More difficult does not necessarily mean more brain: fMRI correlates of distinct levels of difficulty for phonological and semantic processing of words in normal subjects* [1998, *Brain and Language*, 65, 90-92] s'intéresse de manière privilégiée à l'impact de degrés de complexité des stimuli sur le traitement phonologique aussi bien que sémantique des mots. L'étude *Phonological and semantic processing on single word: an fMRI study* (soumise) précise les aires cérébrales activées pour les deux types de traitement des mots.

4. Éléments de méthodologie communs aux différentes études

Pour explorer la contribution de chacun des deux hémisphères cérébraux à divers traitements langagiers, comme le traitement phonologique ou sémantique, différentes techniques peuvent être utilisées. Dans le cadre de cette thèse, deux d'entre elles ont été choisies: la présentation en champ visuel divisé et l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle.

4.a. La présentation en champ visuel divisé

Cette méthode consiste en la présentation brève de stimuli, sous forme de mots ou d'images par exemple, dans l'un des deux hémichamps visuels, droit (CVD) ou gauche (CVG). L'organisation structurale du système visuel (voir figure 3) fait en sorte que les stimuli qui sont présentés d'un côté du point de fixation central sont adressés directement au seul hémisphère controlatéral.

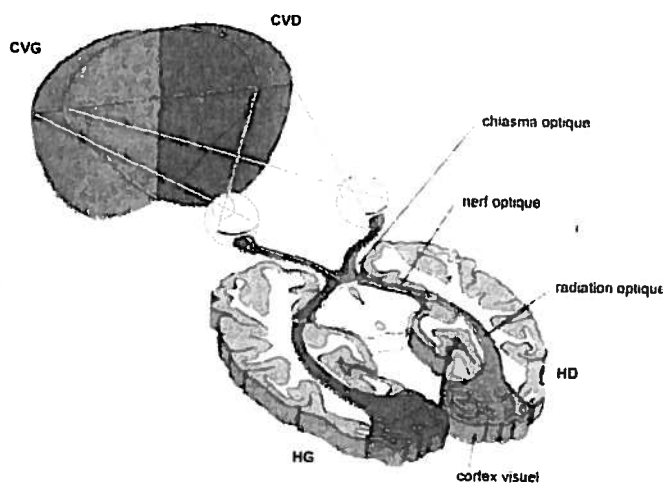


Figure 3. Système visuel et présentation latéralisée. Les informations projetées dans le champ visuel droit (CVD, en gris foncé) sont adressées à l'hémisphère cérébral gauche (HG) pendant que celles qui apparaissent dans le champ visuel gauche (CVG, en gris clair) le sont à l'hémisphère droit (HD), via le nerf et les radiations optiques, jusqu'aux aires visuelles localisées au niveau du cortex occipital.

Le postulat de base sur lequel s'appuie cette méthode de présentation en champ visuel divisé est que, suite à un traitement donné, la performance enregistrée sera meilleure si un stimulus est présenté initialement à l'hémisphère spécialisé pour le traitement demandé et/ou pour le type de matériel proposé (pour une revue, voir Sergent, 1994). Par exemple, les habiletés langagières de l'hémisphère gauche étant supérieures à celles de l'hémisphère droit, les stimuli verbaux présentés dans l'hémichamp visuel droit, se projetant au niveau des aires visuelles gauches, sont associés à une meilleure performance de traitement que ceux qui sont vus dans le champ visuel gauche. Ainsi, l'examen des réponses produites en fonction du site de projection des stimuli permet

alors de mieux cerner la spécialisation fonctionnelle de chacun des deux hémisphères (Hellige, 1996).

Contraintes méthodologiques

Pour optimiser la pertinence des résultats obtenus lors de l'utilisation de cette méthode, un certain nombre de contraintes, autant spatiales que temporelles, exigent d'être respectées. Ainsi, la stimulation doit exclure la zone fovéale du champ visuel car cette dernière est représentée de manière bilatérale au niveau des aires cérébrales occipitales. La projection des stimuli se fait donc à 2.5° d'angle visuel au moins, à droite ou à gauche d'un point de fixation central (Beaumont, 1982). La durée de présentation des stimuli doit être inférieure au temps de déclenchement d'une saccade oculaire, estimé entre 80 et 220 ms (Viviani, 1994), pour éviter que l'image se retrouve en vision centrale et donc projetée bilatéralement aux aires visuelles.

4.b. L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf)

Cette méthode utilise le phénomène de résonance magnétique fonctionnelle (RMN) découvert en 1946 par Bloch *et al.* ainsi que Purcell *et al.*, de manière indépendante. D'abord utilisée comme outil pour l'analyse des structures moléculaires en chimie, la RMN ne devient une application médicale qu'au début des années soixante-dix. Il faut en fait attendre jusqu'en 1980 pour que les premières images de la tête soient obtenues par l'équipe de Holland (Holland *et al.*, 1980). Très vite, dans le domaine du diagnostic clinique, l'imagerie par résonance magnétique (IRM) s'impose comme la plus précise des méthodes d'imagerie morphologique et notamment dans l'étude du système nerveux central. Parallèlement au développement de l'imagerie anatomique se développent de nouvelles méthodes pour explorer la fonction de différents organes. C'est ainsi que la première image d'activation cérébrale obtenue en IRM a été publiée au début des années 1990 par l'équipe du Massachusetts General Hospital de Boston (Belliveau *et al.*, 1991). Différentes avancées technologiques ont permis depuis lors d'améliorer encore l'imagerie dynamique, faisant de l'IRMf une méthode non invasive des plus pertinentes pour l'étude d'une fonction cérébrale aussi complexe que le langage.

Comprendre les mécanismes qui régissent cette technique d'imagerie fonctionnelle est une opération complexe car elle fait appel à de nombreuses connaissances physiques. En fait, l'IRMf est une technique qui permet d'imager les variations de signal d'origine vasculaire qui accompagnent la modulation de débit sanguin par l'activité synaptique (Fox et Raichle, 1986). Ce n'est pas la première fois que la relation est établie entre le cerveau au travail et le système circulatoire, puisque déjà en 1890, Roy et Sherrington énoncent le postulat que "le cerveau possède un mécanisme intrinsèque par lequel sa perfusion peut varier localement en correspondance avec des variations locales de son activité fonctionnelle" (Roy et Sherrington, 1890).

Différentes approches ont été utilisées pour rendre optimale l'acquisition du signal, qui nécessitent l'injection d'un agent de contraste (e.g., gadolinium) ou qui s'appuient directement sur les effets magnétiques du sang pénétrant dans la coupe imagée. Parmi ces dernières approches, la méthode BOLD (pour *Bold Oxygen Level Dependent contrast*) reste celle qui est le plus souvent utilisée, exploitant les propriétés magnétiques de l'hémoglobine (voir figure 4).

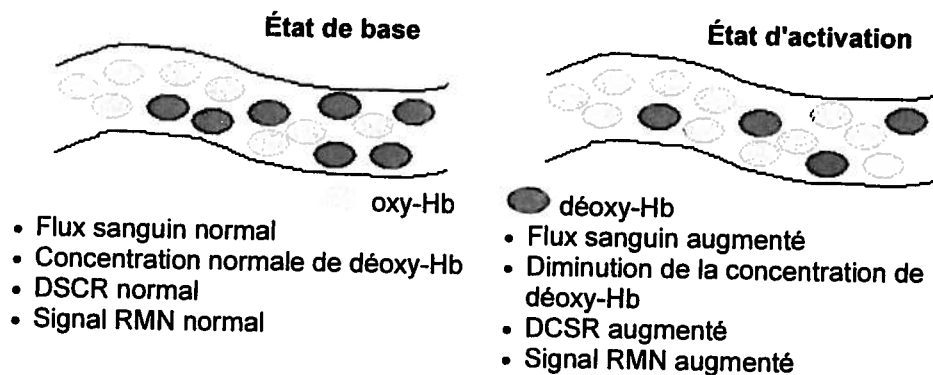


Figure 4. La méthode BOLD se comprend par la comparaison entre deux états d'oxygénation dans les capillaires sanguins cérébraux, c'est-à-dire du ratio oxyhémoglobine [oxy-Hb] / déoxyhémoglobine [déoxy-Hb] (traduit de P. Jezzard, <http://www.fmrib.ox.ac.uk/physics>).

La méthode BOLD repose sur le postulat selon lequel l'activation neuronale s'accompagne d'une augmentation du débit sanguin cérébral d'environ 20% ou plus (dans les cortex primaires, sensoriels ou moteurs), non compensée par une augmentation équivalente de la consommation en oxygène qui est d'environ 5%. Il en résulte une augmentation de la saturation capillaire et veineuse en oxygène dans le

territoire cérébral drainé et donc une diminution de la concentration relative en déoxyhémoglobine (Villringer et Dirnagl, 1995). La déoxyhémoglobine est une molécule paramagnétique qui diminue le signal local par un effet de susceptibilité magnétique (effet T2*). La diminution de concentration en déoxyhémoglobine pendant l'activation cérébrale diminue ces effets de susceptibilité magnétique et on observe donc une augmentation localisée et faible (1 à 5%) du signal dans la zone activée par rapport à l'état de repos (voir figure 5).

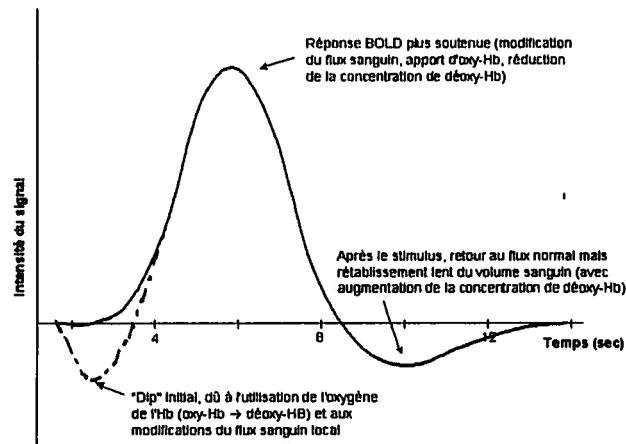


Figure 5. Enregistrement du signal BOLD suite à une stimulation, en fonction du temps (traduit de P. Jezzard, <http://www.fmrib.ox.ac.uk/physics>).

Contraintes méthodologiques

Les avantages principaux de l'IRMf sont sa résolution spatiale¹¹ (< 1mm) et sa résolution temporelle¹² (< 1sec), ainsi que la possibilité d'acquérir chez un même individu des images multiples et répétées, de manière totalement non invasive. Néanmoins, les difficultés liées à l'utilisation de l'IRMf sont nombreuses et se situent tant au niveau des techniques d'acquisition que du traitement des données, de l'analyse et de la présentation des résultats. Le premier point à considérer dans une étude utilisant l'IRMf est la valeur du champ magnétique. La plupart des études publiées ont été réalisées avec des champs magnétiques de 1.5 ou 2 Teslas, puisque le parc des appareils de ce type est extrêmement étendu. Cependant, puisque le signal

¹¹ Degré de précision et de clarté de l'image fournie, définie par la distance ou écart angulaire le plus petit permettant de discriminer deux objets voisins.

¹² Différence de temps la plus petite permettant de discriminer deux instants voisins, i.e. deux volumes d'acquisition.

enregistré avec la méthode BOLD est d'intensité relativement faible, il faut tâcher d'en maximiser l'effet tout en diminuant le bruit. Les effets de susceptibilité magnétique augmente avec le champ (par exemple si le champ magnétique utilisé passe de 1.5 à 3 T) mais ils sont aussi responsables des artefacts qui apparaissent aux interfaces os / air / tissu (e.g., sinus maxillaires, conduits auditifs externes). Par ailleurs, les signaux acquis sont extrêmement sensibles aux mouvements du sujet et si le traitement des images permet de corriger quelque peu les mouvements de la tête, il convient de les limiter autant que possible par des moyens de contention ne nuisant pas au confort du sujet.

Pour permettre la visualisation des aires cérébrales dont l'activation diffère lors d'une tâche donnée, le paradigme de soustraction est couramment utilisé. Ce paradigme répond à la logique élémentaire d'activation (stimulus / réponse) qui s'appuie sur une compréhension hiérarchique et additive des fonctions cognitives. Cela suppose une correspondance quasi terme-à-terme entre les composantes cognitives des tâches d'activation / référence et leurs éventuels corrélats neuronaux

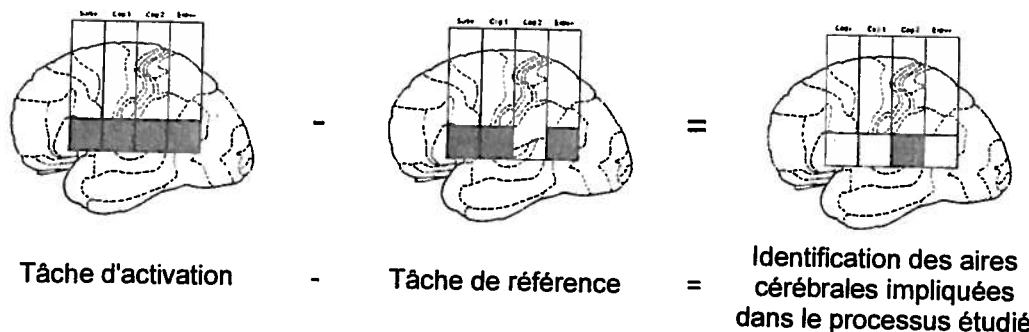


Figure 6. Compréhension du paradigme de soustraction. Ici, *Entrée* correspond à l'écoute de stimuli verbaux, *Sortie* à la production d'une réponse verbale, *Cog.1* à la transposition audiophonatoire et *Cog.2* à l'association sémantique (Petersen *et al.*, 1988).

Par exemple, dans les travaux rapportés par Petersen *et al.* (1988) illustrés par la figure 6, la tâche d'activation consiste en la génération de verbes sémantiquement reliés à des noms présentés de manière auditive. La tâche de référence est une simple répétition de stimuli verbaux auditifs. La comparaison des deux états résultant de ces tâches, i.e. la "soustraction" des composantes cognitives et de leurs soubassements neurobiologiques, permettrait d'isoler les aires cérébrales qui sont impliquées dans les

processus d'association sémantique. Cette conception hiérarchique et additive des composantes cognitives impliquées dans la génération de verbes, ignore le fait qu'un traitement sémantique même minimal est fort probable durant la répétition de mots, considérée comme référence (ou état "neutre"). Comment ne pas supposer que les activations cérébrales qui sont produites par cet état de référence sont suffisantes pour diminuer (voire faire disparaître) le contraste entre les deux tâches? Cela conduirait à penser que des aires cérébrales, pourtant impliquées dans la génération de verbe, ne sont pas révélées car communes aux deux tâches utilisées (Démonet, 1999). Différentes options sont explorées pour contourner ce problème de la soustraction des tâches. Entre autres, il devrait être possible d'utiliser des niveaux de complexité différents à l'intérieur d'une même tâche.

Chapitre 2

CHOIX MÉTHODOLOGIQUES

Étude 1

Grapheme-phoneme processing of single words
[2001, Brain and Cognition, 46, 295-299]

26

Étude 2

Semantic single word processing in French: a study in divided visual hemifields
[2002, Brain and Language, 83, 179-182]

36

Étude 1

GRAPHEME-PHONEME PROCESSING OF SINGLE WORDS

Nathalie WALTER, Stéphanie CLICHE, Sven JOUBERT, Mario
BEAUREGARD & Yves JOANETTE

BRAIN AND COGNITION, 46, 295-299 (2001)

Abstract	27
Introduction	28
Method	29
Subjects	29
Tasks and stimuli	29
Procedure	29
Results and discussion	30
Task 1: Grapheme-phoneme matching on the final syllable of the word	30
Task 2: Grapheme-phoneme matching within the word	32
Conclusion	32
References	35

Abstract

Often used in cognitive studies measuring reaction times and in functional imaging studies, the subtraction paradigm is based on the comparison of performance on tasks presupposed to refer to different cognitive levels of processing. Within the framework of the study of phonological processing of words, manipulating the grapheme-phoneme transparency of stimuli can represent a means of counteracting the methodological drawbacks inherent to the subtraction paradigm. Thus, the purpose of this study was to determine the effect of the level of difficulty of grapheme-phoneme matching on the processing of transparent and non-transparent words. Grapheme-phoneme matching was carried out both on the final syllable of words and on sublexical segments within the word. The results indicate that processing is faster for the transparent than for the non-transparent stimuli. This task will now have to be reintroduced in brain imaging studies aiming to look at different levels of difficulty for grapheme-phoneme matching.

Introduction

The identification of the distinct and numerous brain regions involved in aspects of language is a paramount task that has been undertaken (Démonet, 1997). However, most studies have suffered from the application of the subtraction paradigm. This paradigm is not new nor is it unique to functional imaging: It has been applied to the study of mental processes for more than a century now and has shown its limits (Démonet *et al.*, 1991). In order to counteract the difficulties resulting from the subtraction of two cognitive tasks, a possible alternative is to manipulate processing difficulty within a task (Sternberg, 1969).

The use of different levels of difficulty has already been used in functional imaging, notably in positron emission tomography (PET) studies. For example, Démonet *et al.* (1992, 1994) have studied certain aspects of phonological processing at the phoneme, syllable, and word level. These studies assumed that there exists a hierarchy in the processing of these three types of stimuli, and that there exists different levels of difficulty. The operations involved in the processing of phonemes or words may not be as partitioned as they appear to be. The notion of difficulty should then be considered within the limits of the same task, by manipulating the characteristics of the stimuli rather than the type of task.

Contrary to many other alphabetic languages, French is not a transparent writing system. In fact, certain phonemes (such as the /o/) have different written forms (e.g., "o", "au"). Consequently, the grapheme-phoneme correspondences contain several levels of difficulty which are a function of the degree of transparency of the stimuli used. Thus, stimuli are probably not processed in the same way depending on whether they are transparent words (i.e. which contain both the phoneme /o/ and the grapheme "o", or neither one of them) or non-transparent words (i.e. which contain either the phoneme or the grapheme). Furthermore, the position of the target sound is considered to be an additional factor of difficulty. In fact, the sought-after phoneme and/or the corresponding grapheme can either be positioned at the level of the final syllable or within the word. Since reading is carried out from left to right, the detection of the target sound should vary as a function of its position in the presented word.

In anticipation of a future application in functional imaging, the purpose of the present study was to evaluate the use of distinct levels of difficulty within the same task rather than across different tasks. A study using grapheme-phoneme matching is described in which two types of levels of difficulty are explored. We hypothesized that the position of the target sound will play a significant role. Thus, in the first task, the sound /o/ is found in the final syllable of the word while in the second task it is found anywhere in the word except in the final syllable. Moreover, manipulating the transparency of the stimuli is possible in French, which allows us to obtain stimuli with distinct levels of difficulty.

Method

Subjects

All subjects were normal, right-handed, University graduate students. For Task 1, there were 12 subjects (11 females + 1 male) whose mean age was 25.5 years (ranging from 23 to 28 years). For Task 2, there were 16 subjects (16 females) whose mean age was 22.6 years (ranging from 19 to 25 years).

Tasks and stimuli

Subjects were asked to complete a grapheme-phoneme matching task where they had to decide if the presented word contained the target sound /o/ or not. The graphemic expression of the sound /o/ was either transparent (grapheme "o") or non-transparent (graphemes "au", "eau"). Searching for the appropriate match between the sound and the grapheme was carried out either on the final syllable of the word (Task 1) or within the word (Task 2).

The stimuli were French words, 4 to 9 letters long. In each task, 128 stimuli (64 target words and 64 distractors) were presented visually and the degree of graphemic transparency was divided into two levels of difficulty (see Table 1).

Procedure

Stimuli were presented one by one at the center of a computer screen. Subjects had to respond with their right hand by pressing one of two buttons on a box connected to

the computer. A fixation point determined the position of appearance of the stimuli. Length of presentation for each stimulus was 500 msec and subjects had a time limit of 1500 msec to answer. Responses and reaction times (RTs) were measured for each stimulus using PsyScope, version 1.0 (Cohen *et al.*, 1994).

Table 1. Stimuli in the grapheme-phoneme tasks, with emphasis on the final syllable (task1) and within the word (task2).

Task 1			
		Type of stimuli	
		Targets	Distractors
Stimuli transparency	transparent	TT <i>lavabo (=sink)</i>	TD <i>cierge (=candle)</i>
	non transparent	NTT <i>assaut (=assault)</i>	NTD <i>boulon (=bolt)</i>

Task 2			
		Type of stimuli	
		Targets	Distractors
Stimuli transparency		TT: transparent <i>rosaire (=rosary)</i>	NID: non-interfering <i>balise (=beacon)</i>
		NTT: non transparent <i>nausée (=nausea)</i>	ID: interfering <i>tourbe (=peat)</i>

TT: transparent target word
TD: transparent distractor
NID: non-interfering distractor

NTT: non-transparent target word
NTD: non-transparent distractor
ID: interfering distractor

Results and discussion

Results obtained for each grapheme-phoneme-matching task are reported separately. Judgements on the final syllable are presented first followed by judgements on segments comprised within the word. In both cases, however, errors and outliers (± 2 S.D) were excluded from the analysis.

Task 1: Grapheme-phoneme matching on the final syllable of the word

Overall, processing of target words (RT = 517 msec) was significantly faster [$t_{46}=1.65$, $p<0.001$] than that of distractors (RT = 530 msec). This result suggest that it was easier to select a word than to reject it. Processing of syllables at the end of

distractor words deals with several phonemic possibilities while that of targets deals only with the target sound /o/.

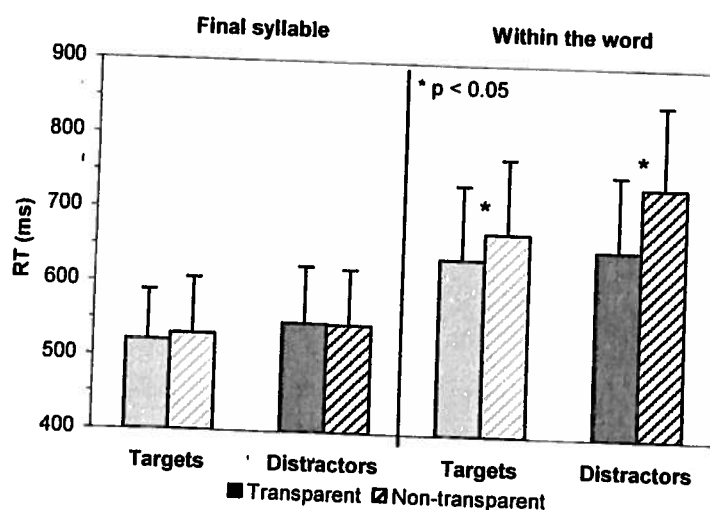


Figure 1. Mean RTs relative to the degree of transparency of the stimuli for both grapheme-phoneme matching tasks.

In the first task, the analysis of RTs based on the type and the degree of transparency of the stimuli does not show any significant difference. Consequently, it would seem that there is no effect of transparency when grapheme-phoneme-matching deals with the final syllable of the word (see Figure, 1, left part). However, and despite the fact that the stimuli were controlled for length and lexical frequency, it turned out that the effects of transparency and lexical frequency were opposite: Transparent stimuli (i.e. poor degree of difficulty) have a very high lexical frequency, and vice-versa. Therefore, the absence of a significant difference between transparent and non-transparent words could express a composite/opposite effect of these words' features: transparency and frequency. Therefore, this result may also suggest that the subjects had no difficulty with the task because they were highly skilled readers.

In order to counterbalance the opposition between the effects of transparency and lexical frequency of the stimuli, additional analyses were performed on 80 stimuli in order to strictly control the lexical frequency of each subgroup. Consequently, the comparison of target processing shows a significant difference relative to the level of transparency [$t_{38} = 1.69$, $p = 0.02$]. Processing of non-transparent targets (NTT) (RT =

536 msec) is in fact slower than that of transparent targets (TT) (RT = 518 msec). Therefore, controlling lexical frequency allows the transparency effect to surface.

Task 2: Grapheme-phoneme matching within the word

For Task 2, distractors (RT = 697 msec) were processed significantly more slowly [$t_{62}=1.65$, $p<0.001$] than targets (RT = 659 msec). Moreover, the mean RT (681 msec) was much longer than that obtained in Task 1 (RT = 524 msec). In this condition, the position of the /o/ sound is not specifically determined in the instructions. It can be positioned anywhere within the word, except in the final syllable. Searching for the target sound thus requires the whole word to be processed. This is not the case with the stimuli in Task 1.

Analysis of RTs in regard to the transparency of the stimuli shows a significant difference [$F_{(1,15)}=134.80$, $p<0.001$]. In fact, transparent words (RT = 650.65 msec) are processed significantly faster than non-transparent words. The interaction between TYPE OF STIMULUS (targets *versus* distractors) and TRANSPARENCY (transparent *versus* non-transparent stimuli) is also significant [$F_{(1,15)}=7.19$, $p<0.02$]. An observation of simple effects shows a difference between TT and NTT [$F_{(1,15)}=43.19$, $p<0.001$], between non-interfering distractors (NID) and interfering distractors (ID) [$F_{(1,15)}=64.56$, $p<0.001$], between NTT and DI [$F_{(1,15)}=11.58$, $p<0.004$], but not between TT and NID [see Figure 1, right part]. These results emphasize the fact that the principal difficulty in this task results from the potential interfering effect of multiple grapheme-phoneme matches. In fact, processing is similar for words that contain either both the target sound and target word (TT), or neither one of them (NID). Consequently, it appears that the degree of transparency of stimuli is a relatively good predictor of the degree of difficulty of a grapheme-phoneme-matching task.

Conclusion

Grapheme-phoneme matching appears to allow the objectivation of different levels of processing of isolated words. However, the effect of transparency evidenced in this study, particularly in Task 2, can be questioned in light of the processes that are

involved in reading. Indeed, longer RTs for non-transparent words may be due to an increase in the processing difficulty. It is also possible that a grapheme comprising two or more letters ("au", "eau") takes longer to read than a single-letter grapheme ("o"). However, subjects who participated in this study were all graduate students with excellent reading skills (Bub and Lewine, 1988). It is thus very likely that they read words in their global visual and phonological forms, and that assembling letters into a word was a highly automatic process.

Results also indicated that the position of the target sound played a determining role in processing words. RTs were longer when grapheme-phoneme matching took place within the word than when grapheme-phoneme-matching occurred at the end of the final syllable. In a rhyme judgement task, for example, the subject can focus his/her attention at the end of each word. When judgements can take place anywhere within the word, however, the subject must "sweep" the whole word which requires significantly more time.

The results obtained bring out a difference in the processing of single words based on their degree of transparency. Therefore, it appears easier (or it requires less time at least) to process transparent words, in the same way as frequent or concrete words require less time to be processed. Nevertheless, one has to take into account the nature of the proposed task. Grapheme-phoneme-matching relates the written form of a word to its phonological correspondence. Relative to the observed effect, is the difference in RTs obtained due to the degree of transparency of the words or to the interference that can exist between the written and phonological forms of the word? Indeed, there is an additional degree of difficulty when the letter "o" is present in a word, but is not matched with the phoneme /o/ (e.g. 'comte' or 'poire' in French). It seems that the appropriateness between the phoneme /o/ and the potential graphemes ("o", "au") is not sufficient to explain the transparency effect. The existence of a transparency effect is further supported by the difference in processing of transparent and non-transparent distractors.

This study provides further support to the fact that words of distinct levels of grapheme-phoneme transparency are indeed processed differently. Results reported here could influence the manner in which functional brain imaging studies using the

subtraction paradigm are to be conducted in French. Classically, those studies are based on the subtraction between the cerebral activity associated with targeted task (e.g. grapheme-phoneme-matching) and that generated by a neutral reference task. The identification of behaviorally confirmed distinct levels of difficulty in a single task as reported here, would alternatively - or in a complementary manner - offer the possibility of subtraction brain activities associated with distinct levels of difficulty in a given task, thus allowing for a less confounded interpretation of functional brain imaging results.

References

- Bub, D.N., & Lewine, J. (1988). Different modes of word recognition in the left and right visual fields. *Brain and Language*, 33, 161-188.
- Cohen, J.D., MacWhinney, B., Provost, J., & Flatt, M. (1994). *PsyScope, version 1.0*. Pittsburgh, PA: Department of Psychology, Carnegie Mellon University.
- Démonet, J.F. (1997). Le traitement du langage. In S. Dehaene (Ed.). *Le cerveau en action*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Démonet, J.F., Chollet, F., Ramsay, S., Cardebat D., Nespoulous, J.L., Wise, R., Rascol, A., & Frackowiak, R. (1992). The anatomy of phonological and semantic processing in normal subjects. *Brain*, 115, 1753-1768.
- Démonet, J.F., Nespoulous, J.L., & Celsis, P. (1991). L'activation cérébrale au cours de tâches linguistiques: réflexions méthodologiques. *Revue de Neuropsychologie*, 1, 281-293.
- Démonet, J.F., Price, C., Wise, R., & Frackowiak, R. (1994). A PET study of cognitive strategies in normal subjects during language tasks. Influence of phonetic ambiguity and sequence processing on phoneme. *Brain*, 117, 671-682.
- Sternberg, S. (1969). The discovery of processing stages: extension of Donder's method. In W.G. Koster (Ed.). *Attention and performance II, Acta Psychologica*, 30, 276-315.

Étude 2

SEMANTIC SINGLE WORD PROCESSING IN FRENCH: A STUDY IN DIVIDED VISUAL HEMIFIELDS

Nathalie WALTER, Mario BEAUREGARD & Yves JOANETTE
BRAIN AND LANGUAGE, 83, 179-182 (2002)

Introduction	37
Method	37
Results	38
Discussion	39
References	40

Introduction

More than one century after Broca's discovery, many studies have addressed the question of whether language is exclusively lateralized to the left hemisphere (LH) in right-handers (e.g., Joanette *et al.*, 1990). The right hemisphere (RH) appears to contribute to single word processing according to specific variables (e.g., frequency, imageability). Many studies have already reported behavioral results suggesting that the RH is involved during semantic processing in different populations [split brain subjects (e.g., Gazzaniga, 1970); normal subjects (e.g., Karapetsas et Andreou, 2001); right-hemisphere damaged patients (e.g., Gagnon *et al.*, 2003)]. The question now pertains not to the nature of the RH contribution to semantic word processing. Thus, current research has focused on which lexico-semantic variables activate the RH's potential. For example, Koivisto and Laine (1999) showed that the prototypicality of words significantly influenced the RH performance. However, few studies have looked at divided visual field semantic processing abilities in languages other than English. The goal of the present study was precisely to investigate the contribution of the two hemispheres to the semantic processing of single words of two different prototypicality levels in French. A category judgment task, where stimuli were presented in divided visual hemifields, was used to explore the abilities of the RH and the LH.

Method

Twenty French-speaking students participated in this study. They were young females (ranging from 19 to 21 years), university educated (ranging from 14 to 15 years) and right-handed (more than 88% on the Edinburgh test). A category judgment task was used, where the subjects had to indicate if a given word belonged to the category of animal or not. All stimuli were French words between 4 and 9 letters long. There were 64 targets and 64 distractors, for a total of 128 stimuli. The degree of prototypicality determined two levels of difficulty for the targets. Thus, the risk of floor or ceiling effects was controlled. The distractors were strictly paired to the target in terms of length and lexical frequency (Content et Radeau, 1988). The words

were projected in the center, right or left of the computer screen for 200 ms. Accuracy and response times were recorded.

Results

A 3-way ANOVA (*Type* x *Prototypicality* x *Position*) was conducted using response times (RT) as the dependent variable. One subject was excluded due to excessive error rate (44.73%). Stimuli were removed for a subject when there was (1) an error, (2) a RT less than 200 ms or greater than 2000 ms, or (3) a RT larger than the mean \pm 2 standard deviations. The results showed a triple interaction between *Type* (targets vs distractors) of stimulus, presentation site (*Position*), and level of difficulty (*Prototypicality*). However, there was no main effect of *Position* on global RT. Therefore, it seems that the semantic processing of single words is comparable in the RH and the LH, at least in the category judgment task.

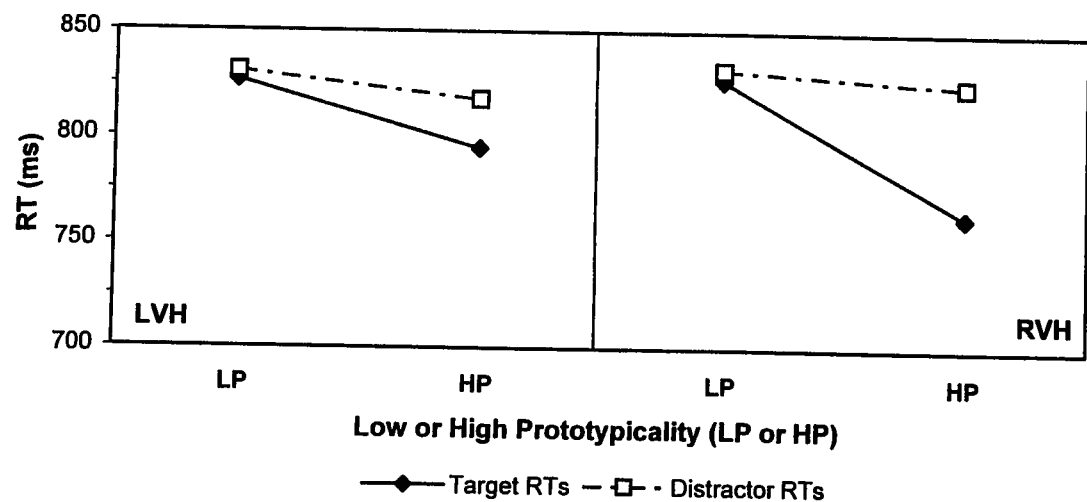


Figure 1. Response times (RT) for low and high prototypicality stimuli in the two visual hemifields.

In the left visual hemifield (LVH), the targets (RT = 810.71 ms) were processed faster [$F_{(1,124)} = 4.36$; $p < 0.05$] than the distractors (RT = 831.42 ms). This result supports the claim that the RH is sensitive to semantic category relationships. Furthermore, in the right visual hemifield (RVH), there was a double interaction *Type* x *Prototypicality*. The analysis showed that there was a *Prototypicality* effect only on

target word processing [$F_{(1,124)} = 20.77$; $p < 0.001$]; the high prototypicality targets (RT = 762.81 ms) were processed faster than the low prototypicality targets (RT = 827.06 ms). The fact that targets belonged to a single semantic category and that distractors came from many different categories could explain this result. Moreover, it seems that the LH was more efficient in processing high prototypicality targets compared to low prototypicality targets.

Discussion

The goal of this study was to better describe the respective contribution of the cerebral hemispheres to single word processing in French. Manipulating level of difficulty (prototypicality) of the stimuli allowed an investigation of the role of each hemisphere. The subjects' performance showed that the LH and the RH participated in the semantic processing of single words, but probably not in an identical way (Taylor *et al.*, 1999). The RH was sensitive to the prototypicality of distractor and target words while the LH was more sensitive to only target words. As expected, the study of single word semantic processing revealed that both hemispheres were implicated during a category judgment task, though in a different way. Present results suggest that all stimuli were processed by the RH according to their level of difficulty (prototypicality) but that only target words were processed by the LH. Whereas both hemispheres contribute to the semantic processing of single words, each of them does it in a specific way related to lexico-semantic factors as well as to its own potential. Future functional neuroimaging studies (e.g., functional magnetic resonance imaging) will be needed to confirm the specific contribution of both the RH and the LH to semantic processing of single words.

References

- Content, A., & Radeau, M. (1988). Données statistiques sur la structure orthographique du français. Brulex. *Cahiers de psychologie cognitive, hors série*.
- Gagnon, L., Goulet, P., Giroux, F., & Joannette, Y. (2003). Processing of metaphoric and non-metaphoric alternative meanings of words after right- and left-hemispheric lesion. *Brain and Language*.
- Gazzaniga, M.S. (1970). *The bisected brain*. New York: Appeltion-Century-Crofts (Eds.).
- Joannette, Y., Goulet, P., & Hannequin, D. (1990). *Right hemisphere and verbal communication*. Springer Verlag: New York.
- Karapetsas, A., & Andreou, G. (2001). Visual field asymmetries for rhyme and semantic tasks in fluent and nonfluent bilinguals. *Brain and Language, 78*, 53-61.
- Koivisto, M., & Laine, M. (1999). Strategies of semantic categorization in the cerebral hemispheres. *Brain and Language, 66*, 341-357.
- Taylor, K., Brugger, P., Weniger, D., & Regard, M. (1999). Qualitative hemispheric differences in semantic category matching. *Brain and Language, 70*, 119-131.

Chapitre 3

ÉTUDE COMPORTEMENTALE EN CHAMP VISUEL DIVISÉ

Étude 3

Contributions hémisphériques au traitement phonologique et sémantique de mots isolés

[2003, Revue de neuropsychologie, 13, 323-345]

42

Étude 3

CONTRIBUTIONS HÉMISPHERIQUES AU TRAITEMENT PHONOLOGIQUE ET SÉMANTIQUE DE MOTS ISOLÉS

Nathalie WALTER, Mario BEAUREGARD & Yves JOANETTE

REVUE DE NEUROPSYCHOLOGIE, 13, 323-345 (2003)

Résumé (en Français)	43
Abstract (in English)	44
Introduction	
Contributions hémisphériques au traitement phonologique des mots isolés	46
Contributions hémisphériques au traitement sémantique des mots isolés	47
Méthodologie	
1. Sujets	52
2. Tâches et stimuli	52
3. Déroulement de l'expérience	52
4. Analyse des données	54
Résultats et Discussion	
1. Traitement phonologique des mots isolés: appariement graphophonémique	55 55
2. Traitement sémantique des mots isolés: jugement d'appartenance catégorielle	57
3. Performances observées aux tâches phonologique <i>versus</i> sémantique	60
Conclusion	60
Références	63
Annexe	65

Résumé

L'évolution des connaissances quant au rôle respectif des deux hémisphères cérébraux dans le langage conduit à s'interroger sur l'éventuelle différence de latéralisation des réseaux neuronaux impliqués dans le traitement de mots isolés. L'objectif de la présente étude est de mieux cerner la contribution des hémisphères gauche (HG) et droit (HD) au traitement de la forme et du sens de mots isolés en Français. Réalisée auprès de jeunes femmes francophones et droitières, la présentation en champ visuel divisé de mots isolés est utilisée dans deux tâches d'appariement graphophonémique (phonème /o/, graphèmes "o" et "au") et de jugement d'appartenance catégorielle (animaux), en fonction du degré de complexité des stimuli. L'enregistrement des temps de réponse et de la qualité des réponses confirme les données comportementales et en neuroimagerie montrant que les réseaux neuronaux impliqués dans le traitement phonologique seraient distribués au niveau de l'HG alors qu'ils seraient distribués bilatéralement pour le traitement sémantique des mots.

Remerciements à Odette Huot pour la cueillette des données. Ce travail a été rendu possible grâce à l'appui du FCAR pour le Groupe de recherche en neuropsychologie expérimentale (N.W.), des Instituts de recherche en santé du Canada [no MT-15006] (Y.J.) et de la Fondation des maladies du cœur du Canada [no YJ-13-FMCQ] (Y.J.).

Phonological and semantic single word processing: A divided visual field study

Introduction. It is known that the processing of single words is the prerogative of the left hemisphere (LH), although the right hemisphere (RH) contributes with respect to specific variables (e.g., frequency, imageability). The goal of the present study was to investigate the contribution of both hemispheres to the semantic and phonological processing of single French words across two difficulty levels, using a divided visual field paradigm.

Method. Twenty French-speaking female students (from 19 to 21 years old) participated in this study. They were university educated (from 14 to 15 years) and right-handed (more than 88% on the Edinburgh test). Single word phonological processing was measured by asking subjects to complete a grapheme-phoneme matching task where they had to decide if the presented word contained the target sound /o/ or not. Semantic processing was studied using a category judgement task, wherein the subjects had to indicate whether a given word belonged to the category of animals or not. The two levels of difficulty were determined by the degree of (1) transparency for the phonological task, and (2) target prototypicality for the semantic task. The words were projected in the right or left of the computer screen for 200 ms. Accuracy and response times were recorded.

Results. Two 3-way ANOVAs were used to analyse results for both phonological and semantic processing of single words. For phonological processing, response patterns showed that both hemispheres carry out varying types of single word processing. The LH was found to be faster at stimulus processing and more sensitive to *Transparency* than the RH. In contrast, it appeared that the semantic processing of single words was similar across both hemispheres in the category judgement task with a *Prototypicality* effect on RTs.

Discussion. Results showed an unexpected asymmetry between response patterns in the right and left visual hemifields but for phonological processing only. As such, it seems that the neural networks involved in the phonological processing elicited by our grapheme-phoneme matching task are limited to the LH. For the semantic

processing elicited by the category judgement task, the neurobiological substrate appears to be evenly distributed across both the LH and the RH.

Mots-clés: latéralisation hémisphérique, appariement graphophonémique, appartenance catégorielle, hémisphère gauche, hémisphère droit.

Key words: hemispheric lateralization, grapheme-phoneme matching, category judgment, left hemisphere, right hemisphere.

Titre courant: Contributions hémisphériques au traitement de mots

Abréviations utilisées: CVD: champ visuel droit, CVG: champ visuel gauche, HD: hémisphère droit, HG: hémisphère gauche, TR: temps de réponse, ms: milliseconde.

Introduction

L'hémisphère gauche (HG) a longtemps été considéré comme seul capable de soutenir les comportements de communication verbale. Ce n'est qu'à partir des années 60 que la participation de l'hémisphère droit (HD) au traitement du langage est envisagée. Depuis, de nombreuses études remettent en question le postulat de latéralisation absolue du langage dans le cerveau gauche chez les individus droitiers (pour une revue, voir Joannette *et al.*, 1990) et montrent une certaine participation de l'HD, notamment pour le traitement de mots isolés. Les résultats de diverses approches expérimentales auprès de populations variées (e.g., sujets normaux, individus cérébrolésés, commissurotomisés) laissent à penser que le traitement formel des mots (e.g., phonologique) est sous la responsabilité de réseaux neuronaux essentiellement situés dans l'HG, alors que le traitement du sens des mots (sémantique) dépend de l'intégrité de réseaux distribués aussi bien au sein de l'HD que de l'HG.

L'objectif de la présente étude est de mieux cerner la participation de chacun des deux hémisphères cérébraux au traitement phonologique par opposition au traitement sémantique des mots isolés en Français. A l'aide de la présentation tachistoscopique en champ visuel divisé, deux tâches langagières sont utilisées ici: un appariement graphophonémique, permettant l'exploration des habiletés des hémisphères au traitement phonologique, ainsi qu'une tâche de jugement d'appartenance catégorielle, permettant l'étude des habiletés à traiter la dimension sémantique des mots.

La vision d'une latéralisation fonctionnelle absolue à gauche du langage articulé a longtemps prévalu. Toutefois, de nombreux travaux ont remis en cause cette dominance langagière exclusive du seul HG et ce, dans l'esprit d'une coopération entre les deux hémisphères cérébraux (Sergent, 1994). Les premiers travaux réalisés en champ visuel divisé ont été menés auprès de patients commissurotomisés. Plusieurs équipes se sont en effet penchées sur les habiletés spécifiques de l'HD à traiter les mots chez des sujets normaux. Ainsi, Day (1977) a montré que, pour l'HD, le traitement des mots est fonction de leur degré de concrétude mais non de leur classe grammaticale. De même, Hines (1976) a mis en évidence le potentiel de l'HD à

traiter les mots dont la fréquence d'usage dans la langue est élevée. Sans réfuter cette assertion, Day (1979) souligne l'importance du degré d'imageabilité des mots. L'auteur propose que la reconnaissance des mots dans l'HD est facilitée par un code lexical basé sur l'imageabilité: les mots les plus imageables peuvent être traités par cet hémisphère car ils sont intégrés dans son code lexical. Par contre, les mots de basse imageabilité seraient traités de manière dominante, voire exclusive, par l'HG: soit ces derniers ne s'insèrent pas dans le code lexical de l'HD, soit ils n'ont pas de représentation directe par l'image.

Dès lors, l'HD semble capable de participer au traitement des mots isolés qui présentent des caractéristiques lexico-sémantiques particulières, telles un degré de concrétude ou d'imageabilité élevé. L'une des questions fondamentales qui se posent néanmoins concerne la distinction des soubassements neurobiologiques impliqués d'une part dans le traitement de la forme des mots et, d'autre part, dans celui de leur sens. Cette opposition est la mieux représentée par une comparaison entre les traitements phonologique et sémantique des mots isolés.

Contributions hémisphériques au traitement phonologique des mots isolés

La littérature contient de nombreuses études réaffirmant la prise en charge exclusive, par l'HG, du traitement phonologique (Joanette *et al.*, 1990). Récemment, Karapetsas et Andreou (2001) mettent en évidence la supériorité de l'HG par rapport à son homologue droit, chez des sujets bilingues. Pour ce faire, ils utilisent une tâche de jugement de rime entre deux mots, dont le premier est l'amorce auditive et le second la cible visuelle. Les auteurs montrent que les cibles sont traitées plus vite et avec plus d'exactitude quand elles sont présentées dans le champ visuel droit (CVD) plutôt que dans le champ visuel gauche (CVG). Ainsi, il semble que seul l'HG dispose des habiletés de traitement des mots sur le plan de la phonologie.

Le travail de Crossman et Polish (1988), mené auprès d'anglophones unilingues, offre des résultats qui vont dans le même sens. Dans une tâche de jugement de rime, les auteurs ont utilisé des stimuli qui partagent ou non la même orthographe (e.g., *plea - flea* ou *said - paid*) et/ou la même rime (e.g., *make - ache* ou *mind - wall*). L'avantage évident du CVD pour le traitement des paires de mots qui partagent une orthographe

et une phonologie similaires, suggère que l'HG sous-tend les mécanismes d'extraction de l'information lexicale à partir des dimensions formelles du mot.

Il est donc admis que l'HG est principalement responsable du traitement phonologique des mots. Cependant, cela ne signifie pas que l'HD ne participe aucunement à un tel processus langagier. Pour tenter de mieux comprendre la nature de la contribution de cet hémisphère au traitement des mots, Abernethy et Coney (1990) ont utilisé une tâche de décision lexicale sur des stimuli qui présentaient une similarité phonologique (e.g., *pool - rule*) ou non (e.g., *lacks - rule*). L'originalité de leur travail réside dans l'utilisation simultanée (a) de l'amorçage bilatéral où la présentation de l'amorce et de la cible d'une paire de stimuli a lieu dans le même hémichamp visuel (CVG/CVG ou CVD/CVD) et (b) de l'amorçage croisé pour lequel l'amorce et la cible sont projetées l'une dans un hémichamp et l'autre dans l'hémichamp opposé (CVG/CVD ou CVD/CVG). Les auteurs soulignent ainsi que l'HD n'a pas accès à l'information phonologique, mais qu'il ne doit pas être considéré comme exclu d'un tel traitement puisque la présentation de l'amorce dans le CVD facilite de manière significative la réponse aux cibles présentées dans le CVG. Il est donc possible que l'HD réalise le traitement des stimuli qui lui sont présentés, sans pour autant l'effectuer de la même manière que l'HG.

Différentes études appuient cette notion d'une contribution différente de la part des deux hémisphères cérébraux au traitement des mots. Ainsi, il semble que le traitement lexical ne soit pas identique dans les deux hémisphères cérébraux. Par exemple, dans l'étude de Crossman et Polish (1988), l'avantage du CVG pour les paires de stimuli où il y a conflit entre l'orthographe et la phonologie, suggère que les processus langagiers disponibles à l'HD lui permettrait de résoudre les interférences verbales. Pour ces auteurs, la supériorité de l'HD refléterait alors un processus d'évaluation langagier plutôt qu'un système spécifique d'évaluation du conflit dans le code visuel. En d'autres termes, l'HD reconnaîtrait le stimulus comme un mot et serait capable de le traiter de manière "globale" alors que son homologue gauche s'engagerait dans une analyse plus fine, de façon à traiter ce mot en tenant compte aussi bien de sa nature et de ses caractéristiques propres que de l'éventuel antagonisme pouvant naître de l'interférence que produit l'orthographe du stimulus sur sa forme phonologique

lorsqu'elles ne sont pas adéquates (e.g. *your - hour* par opposition à *dorm - pipe*). Pour mieux cerner cette non-similarité des traitements de mots selon qu'ils sont effectués par l'HG ou l'HD, Rayman et Zaidel (1991) ont utilisé une tâche de jugement de rime sur des mots isolés, toujours sous la forme d'une amorce présentée au centre et d'une cible subséquente dans le CVG ou dans le CVD. Dans un premier temps, seule la cible était présentée, alors que dans un deuxième temps, un distracteur était projeté simultanément dans l'autre hémichamp visuel. Les performances enregistrées révèlent une latéralisation plus marquée pour les mots qui riment quand ils sont présentés bilatéralement, mais les stimuli qui ne riment pas montrent le même effet de latéralisation quand ils sont présentés uni- ou bilatéralement. Dès lors, il semble bien que le traitement phonologique doive également tenir compte de l'existence ou non d'interférence pour une réalisation optimale.

La plupart des études citées ici pour illustrer les travaux portant sur le traitement phonologique de mots isolés font appel à des paradigmes d'amorçage. Une telle méthode implique des processus mnésiques qui peuvent influencer sur les performances enregistrées. De plus, le choix fréquent d'une tâche de jugement de rime, pour évaluer les habiletés de chacun des deux hémisphères à traiter les mots sur un plan phonologique, peut être remis en question. En effet, il semble que la détection d'une rime entre deux mots représente une tâche trop évidente pour des sujets normaux. Khateb *et al.* (2000), par exemple, montrent qu'il n'y a aucune différence significative entre des paires de mots reliés ou non sur le plan de la rime, quel que soit leur site de présentation. L'utilisation d'une tâche d'appariement graphophonémique à l'intérieur des mots pourrait s'avérer être une alternative satisfaisante (Walter *et al.*, 2001).

Contributions hémisphériques au traitement sémantique des mots isolés

De nombreux travaux se sont penchés sur l'étude des habiletés de chacun des deux hémisphères cérébraux à traiter des mots sur le plan de leur sémantique (Joanette *et al.*, 1990). Entre autres, Abernethy et Coney (1990) se sont penchés sur la question de la nature des représentations sémantiques dans les hémisphères cérébraux droit et gauche. Pour ce faire, ils ont utilisé des paires de mots sémantiquement reliés ou non, i.e. qui appartiennent ou non à la même catégorie sémantique. Les résultats obtenus

montrent que l'effet d'amorçage est plus prononcé quand les deux mots sont présentés dans le CVD et que l'HD est capable d'assumer un tel traitement, sans toutefois faire de différence entre les paires reliées ou non. Cela suggère que les hémisphères cérébraux présentent des habiletés distinctes pour le traitement sémantique des mots, mais que l'HG resterait le seul capable de traiter la relation d'appartenance sémantique à la même catégorie pour deux mots. Cette conclusion est remise en cause par le travail de Coney (1998) qui souligne l'existence d'une facilitation de la réponse aussi bien dans le CVG que dans le CVD, dans une tâche de jugement de relation sémantique entre une amorce (texte) et une cible (mot). De même, Karapetsas et Andreou (2001) mettent en évidence une supériorité de l'HD à juger la relation sémantique entre deux mots, l'amorce présentée sous forme auditive et la cible écrite dans l'un ou l'autre hémichamp visuel. Ainsi, en désaccord avec les résultats de Abernethy et Coney (1990), il semble que l'HD contribue néanmoins au traitement sémantique des mots.

Cette apparente contradiction quant à l'habileté de l'HD à effectuer un traitement sémantique sur des mots isolés n'est toujours pas résolue. Différents travaux ont tenté de préciser les aspects lexico-sémantiques qui permettent à l'HD de jouer effectivement son rôle. Par exemple, Koivisto (1998) a proposé d'évaluer le caractère automatique ou postlexical du traitement sémantique en utilisant une tâche de décision lexicale sur des mots sémantiquement reliés ou non, présentés en champ visuel divisé. La manipulation de l'intervalle temporel entre deux essais consécutifs permet de contrôler la nature de l'amorçage induit, automatique *versus* contrôlé. L'auteur montre ainsi que l'activation automatique apparaît seulement dans le CVD/HG, tandis que l'appariement sémantique postlexical semble opérer dans les deux hémisphères ou de manière prédominante dans le CVG/HD. L'avantage de l'HD pour le mécanisme postlexical est renforcé par le fait que ce dernier utilise une stratégie d'appariement sémantique dans la tâche de décision lexicale proposée (Koivisto, 1998). De même, Koivisto et Laine (1999) ont étudié les stratégies de catégorisation sémantique en utilisant des noms d'animaux plus ou moins prototypiques. Ils montrent que l'effet de la prototypicalité des stimuli présentés est plus fort dans le CVG que dans le CVD, ce qui tendrait à confirmer que, dans le

traitement sémantique des mots, l'HD utiliserait une stratégie globale, basée sur une comparaison de similarité entre les stimuli et la catégorie sémantique cible (Koivisto et Laine, 1999).

Dès lors, la question posée ne concerne plus seulement l'éventualité de la contribution de l'HD au traitement du sens des mots, mais plutôt la nature de ce potentiel hémisphérique droit. Déjà en 1987, Drews proposait que le traitement sémantique des mots par l'HG obéissait à une hiérarchie de relations sémantiques logiques, alors que pour l'HD, il reposait plutôt sur de simples associations entre les concepts. De plus, les profils d'activation sémantique évoqués par la présentation d'une paire amorce - cible seraient distribués au niveau des deux hémisphères. En dépit de leurs différences, l'HG comme l'HD seraient donc capables de traiter des mots isolés sur le plan de leur signification. Dans le même sens, Taylor et Taylor (1983) ont approfondi la connaissance des particularités du substrat neuronal droit et gauche du traitement des mots. Les auteurs soulignent que le traitement effectué par l'HG concernerait principalement le décodage et la combinaison des mots ainsi que de leur signification dérivée à un niveau immédiat. Le traitement de l'HD porterait sur la combinaison des idées sous-tendues par les mots et sur leur association à un contexte réel. Ainsi, le traitement du sens des mots serait bien réalisé à droite comme à gauche, mais de manière différente. Taylor *et al.* (1999) avancent l'hypothèse d'une différence de la profondeur d'activation du traitement hémisphérique: le réseau sémantique serait activé de manière rapide et focale dans l'HG, et de manière lente et diffuse dans l'HD. Dès lors, la différence de performance dans le CVG par rapport au CVD s'explique non seulement par les caractéristiques propres du facteur lexico-sémantique manipulé, mais aussi par des stratégies différentes de chacun des deux hémisphères cérébraux.

En somme, il existe plusieurs études laissant penser que les réseaux neuronaux nécessaires au traitement phonologique des mots se limitent à l'HG, alors que ceux requis pour le traitement sémantique se répartissent sur les deux hémisphères. L'objectif de ce travail vise à procéder à l'étude, chez un même groupe de sujets, de l'éventuelle différence de latéralisation pour les traitements phonologique et

sémantique des mots, utilisant le paradigme de présentation en champ visuel divisé. De plus, le fait que cette étude soit effectuée en langue française permet d'étendre aux traitements phonologique et sémantique des mots en français notre connaissance des bases neurobiologiques impliquées dans ces processus cognitifs. Enfin, pour s'assurer de la non-interférence de facteurs reliés à la trop grande facilité (effet "plafond") ou complexité (effet "plancher") des stimuli, chacun des types de traitement langagier, étudiés dans ce travail sera manipulé en fonction du degré de transparence des stimuli pour la tâche phonologique ou du degré de prototypicalité des stimuli pour la tâche sémantique. Il est attendu que (1) pour le traitement phonologique, les stimuli transparents seront traités plus rapidement que les stimuli non transparents, (2) pour le traitement sémantique, les stimuli de haute prototypicalité seront traités plus vite que les stimuli de basse prototypicalité, et (3) la différence de profil de réponse dans le CVG *versus* le CVD sera plus marquée lors du traitement phonologique des mots que lors de leur traitement sémantique.

Méthodologie

1. Sujets

Vingt jeunes femmes, québécoises francophones et étudiantes au premier cycle universitaire ont participé à cette étude. La moyenne d'âge est de 19.4 ans (de 19 à 21 ans) et la durée moyenne de scolarité est de 14.2 ans (de 14 à 15 ans). Tous les sujets sont droitiers (score moyen au test d'Edinburgh: +88.8 (de +78 à +100), Oldfield, 1971).

2. Tâches et stimuli

Deux tâches sont proposées aux sujets. Pour le traitement phonologique des mots isolés, une tâche d'appariement graphophonémique est utilisée, dans laquelle les sujets doivent indiquer si le mot présenté contient le son /o/ ou non. Pour le traitement sémantique, la tâche consiste en un jugement d'appartenance catégorielle: les sujets doivent alors indiquer si le mot présenté appartient ou non à la catégorie des "animaux".

Tous les mots présentés sont des mots de la langue française, comptant de 4 à 9 lettres. Pour chacune des deux tâches, 128 stimuli sont répartis en 64 cibles et 64 distracteurs.

Tableau 1. Exemples de stimuli (cibles c et distracteurs d), présentés pour le traitement phonologique selon leur transparence (stimuli transparents T et non transparents NT) et pour le traitement sémantique selon leur prototypicalité (stimuli de haute prototypicalité HP ou de basse prototypicalité BP).

	Traitement phonologique: appariement graphophonémique		Traitement sémantique: jugement d'appartenance catégorielle	
	non transparent	transparent	basse prototypicalité	haute prototypicalité
cibles	cNT <i>nausée</i>	cT <i>rosaïre</i>	cBP <i>hareng</i>	cHP <i>dauphin</i>
distracteurs	dNT <i>tourbe</i>	dT <i>balise</i>	dBP <i>lavette</i>	dHP <i>alcool</i>

Dans la tâche phonologique, la manipulation du niveau de complexité des stimuli repose sur la notion de transparence graphophonémique. En effet, en français, le son /o/ peut s'écrire avec la lettre 'o' (e.g. *rosaïre*) ou avec un digramme comme 'au' (e.g., *nausée*). Ainsi, les cibles contiennent toujours le son /o/ à l'intérieur du mot, à l'exception de la dernière syllabe (Walter *et al.*, 2001), et s'écrivent ou non avec la lettre 'o'. Les distracteurs ne contiennent quant à eux jamais le son /o/ mais peuvent présenter ou non la lettre 'o' (e.g., *tourbe* ou *balise*), induisant là encore un degré de complexité distinct.

Pour la tâche sémantique, la notion de prototypicalité des stimuli permet de déterminer deux niveaux de complexité. De fait, les cibles ont été choisies selon leur niveau de prototypicalité à l'intérieur de la catégorie des "animaux", selon une classification établie précédemment par un groupe de juges. Les distracteurs appartiennent à d'autres catégories sémantiques et sont appariés un à un aux cibles en termes de fréquence lexicale d'usage (Content *et al.*, 1990).

Pour les deux tâches phonologique et sémantique, les stimuli sont équivalents en termes de longueur de mot (i.e., nombre de lettres) et de fréquence lexicale (Content

et al., 1990). Pour le traitement phonologique, les cibles et les distracteurs sont également appariés sur la base de la fréquence moyenne de digrammes.

3. Déroulement de l'expérience

Les stimuli sont présentés sur un écran d'ordinateur, dans un ordre pseudo-aléatoire. Ils sont projetés dans l'un des deux hémichamps visuels, droit ou gauche. Le centre de chacun des mots présentés se situe à 1.5° de part et d'autre du point central, pour une distance de 60 cm entre l'écran et les yeux du sujet. Le temps de présentation des stimuli est de 200 ms. La faible excentricité des stimuli et leur durée de présentation ont été choisies à la suite d'une pré-expérimentation auprès de cinq personnes comparables aux sujets recrutés ultérieurement. Ces paramètres semblaient optimum pour la réalisation des tâches proposées, i.e. comme générant un taux d'erreurs acceptable. Une durée de 200 ms sépare la réponse du sujet à un stimulus donné et la présentation du stimulus subséquent. Le sujet reçoit la consigne de répondre le plus vite et le mieux possible, à l'aide de deux des touches du clavier, sur lesquelles il appuyait avec l'index de la main gauche selon que sa réponse était "oui" ou "non". La nature de la réponse et les temps de réponse (TR) sont enregistrés simultanément, grâce au logiciel de présentation PsyScope (version 1.1b, 1994).

4. Analyse des données

L'analyse des données consiste en des analyses par item effectuées sur la variable dépendante, les temps de réponse (TR) en millisecondes. Les variables indépendantes considérées sont la *Position* du stimulus présenté (CVG et CVD) et le *Type* de stimulus (cible ou distracteur) auxquelles s'ajoutent la *Transparence* du stimulus (transparent ou non transparent) pour la tâche phonologique et la *Prototypicalité* du stimulus (haute prototypicalité ou basse prototypicalité) pour la tâche sémantique. Toutes les analyses reposent sur l'utilisation d'une ANOVA à trois facteurs, à savoir *Type x Transparence x Position* pour la tâche phonologique et *Type x Prototypicalité x Position* pour la tâche sémantique. Dans les deux cas, le facteur *Position* est un facteur à mesures répétées puisque les items sont présentés aussi bien dans le CVG que dans le CVD. L'analyse des effets simples a été utilisée pour décomposer les interactions significatives, via le logiciel BMDP 2.0.

Résultats et Discussion

L'analyse des performances de chacun des sujets a permis d'identifier un sujet pour qui le taux d'erreurs excessif (44.73%) laisse à penser que la consigne a été mal comprise. Ce sujet a donc été retiré des analyses subséquentes. Quelques essais ont été exclus de l'analyse des performances: d'une part, les erreurs de réponse et, d'autre part, les essais pour lesquels le TR enregistré était inférieur à 200 ms ou supérieur à 2000 ms. Par ailleurs, les essais dont le TR n'appartient pas à l'intervalle [moyenne \pm 2 écarts-types] pour chacun des sujets ont également été exclus.

1. Traitement phonologique des mots isolés: appariement graphophonémique

L'analyse des résultats obtenus en termes de TR lors du traitement phonologique des mots montre une interaction double entre le site de présentation des stimuli (*Position*) et le *Type* (cibles vs distracteurs), de même qu'entre la *Position* et le degré de complexité des stimuli présentés (*Transparence*). Le taux moyen d'essais exclus pour la tâche phonologique est de 20.9% (voir annexe).

1.1. Profils de réponse à droite et à gauche (CVG vs CVD)

Les résultats, obtenus lors de l'appariement graphophonémique, montrent que le traitement phonologique demandé n'est pas effectué de manière identique dans les deux hémichamps visuels (voir figure 1). De manière globale, le TR moyen calculé pour l'ensemble des réponses correctes dans le CVD (TR = 859.11 ms) est plus élevé [$F_{(1,124)} = 10.16$; $p < 0.01$] que celui obtenu pour les stimuli présentés dans le CVG (TR = 835.36 ms). Dans le cas présent, il semble donc que l'HD soit plus rapide à traiter les mots isolés dans une tâche phonologique de ce type. Cependant, et puisque la littérature ne rapporte aucun potentiel particulier de cet hémisphère pour la phonologie, il est difficile d'expliquer l'avantage du CVG noté ici. En fait, considérant les profils de réponse obtenus, et tel qu'avancé dans la littérature (e.g., Abernethy et Coney, 1990), il serait plus juste de dire que les deux hémisphères cérébraux n'effectuent pas le même type de traitement phonologique des mots isolés dans cette tâche. Ainsi, le traitement des mots par l'HD pourrait être plus long en raison de la

mise en œuvre de processus plus analytiques alors qu'une approche plus globale pourrait permettre à l'HD un traitement plus rapide des stimuli présentés.

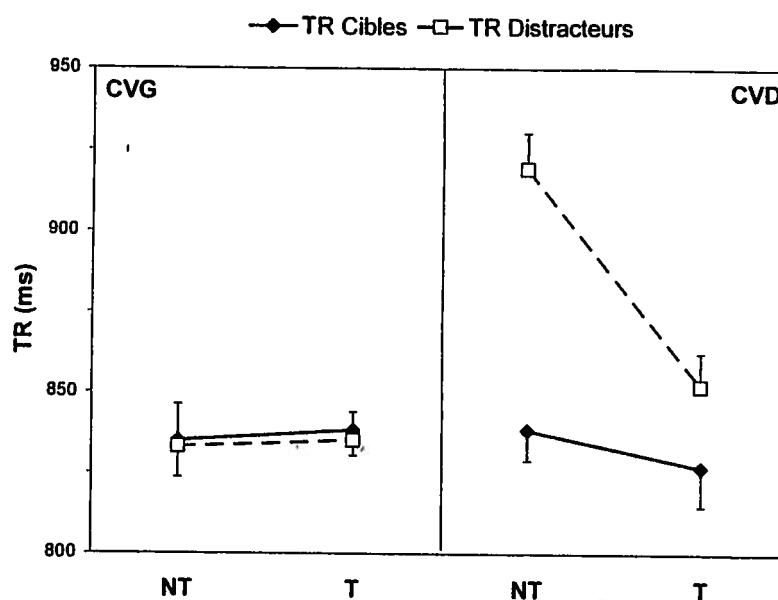


Figure 1. Pour la tâche phonologique, temps de réponse (TR) moyens aux stimuli qui sont non transparents (NT) ou transparents (T), dans le champ visuel gauche (CVG) et droit (CVD).

1.2. Effets de type et de transparence des stimuli dans le CVG

Dans le CVG, il n'y a aucun effet significatif de type ni de transparence des stimuli sur les TR enregistrés. En effet, les distracteurs (TR = 834.11 ms) et les cibles (TR = 836.61 ms) sont traités aussi vite [$F_{(1,124)} = 0.06$; $p > 0.05$] et avec la même exactitude. De même, le traitement des stimuli non transparents (TR = 814.75 ms) et transparents (TR = 823.50 ms) ne se distingue pas [$F_{(1,124)} = 0.06$; $p > 0.05$].

Ainsi, l'HD ne fait aucune différence dans le traitement des mots selon leur type (cibles ou distracteurs) ou leur niveau de transparence (stimuli NT ou T). Cela ne signifie pas que les mots isolés ne soient pas traités mais bien que la nature de traitement n'est pas similaire à celle retrouvée avec l'HG.

1.3. Effets de type et de transparence des stimuli dans le CVD

Globalement, dans le CVD, les cibles (TR = 832.59 ms) sont traitées plus rapidement [$F_{(1,124)} = 24.42$; $p < 0.001$] que les distracteurs (TR = 885.63 ms). Il en est de même [$F_{(1,124)} = 13.40$; $p < 0.001$] pour les stimuli transparents (TR = 839.46 ms) par rapport aux stimuli non transparents (TR = 878.75 ms). En raison de l'interaction double *Type* x *Transparence* [$F_{(1,124)} = 7.41$; $p < 0.01$], l'analyse des résultats obtenus a été décomposée. Ainsi, pour le traitement des cibles, il n'y a aucune différence significative, même si le TR pour les cibles non transparentes (cNT) semble plus grand que celui pour les cibles transparentes (cT). Par contre, le traitement des distracteurs non transparents (dNT; TR = 909.45 ms) est plus lent [$F_{(1,124)} = 19.47$; $p < 0.001$] que celui des distracteurs transparents (dT; TR = 841.24 ms).

Dès lors, il apparaît que l'HG est sensible à la manipulation de la transparence des stimuli dans une tâche d'appariement graphophonémique. Il distingue notamment les distracteurs selon qu'ils sont transparents ou non. Dans le cas des distracteurs transparents, le son /o/ et la lettre 'o' sont absents du mot présenté, ce qui facilite sans doute le rejet du stimulus. Par contre, dans les distracteurs non transparents, si le phonème-cible est effectivement absent, la lettre 'o' apparaît dans le mot pour former les phonèmes /u/, /õ/ ou /wa/. Ainsi, ce graphème interfère avec le traitement des stimuli présentés. En effet, non seulement il semble plus difficile de rejeter un stimulus que de l'accepter, mais l'HG est aussi plus lent à traiter un mot dans lequel l'adéquation entre graphème et phonème n'est pas réalisée, i.e. quand il s'agit d'un stimulus non transparent, que ce soit une cible (e.g., *nausée*) ou un distracteur (e.g., *tourbe*). Donc, contrairement à ce qui se passe pour son homologue droit, l'HG est capable de distinguer les stimuli en fonction de leur degré de transparence graphophonémique.

2. Traitement sémantique des mots isolés: jugement d'appartenance catégorielle

L'analyse des résultats obtenus en termes de TR lors du traitement sémantique des mots ne montre aucune interaction entre le site de présentation (*Position*) des stimuli, leur *Type* (cibles vs distracteurs) et leur degré de complexité (*Prototypicalité*). Le taux moyen d'essais exclus pour la tâche sémantique est de 20.9% (voir annexe).

2.1. Profils de réponse à droite et à gauche (CVD vs CVG)

Dans le cas du traitement sémantique de mots isolés étudié ici, les profils de réponse sont identiques dans les deux hémichamps visuels (voir figure 2). Il n'y a aucune différence significative dans le TR global aux réponses correctes à droite et à gauche [$F_{(1,124)} = 3.21$; $p > 0.05$]. Ainsi, en accord avec la littérature, il semble que le traitement sémantique des mots isolés soit similaire dans l'HG et l'HD, du moins pour ce qui est du jugement d'appartenance catégorielle.

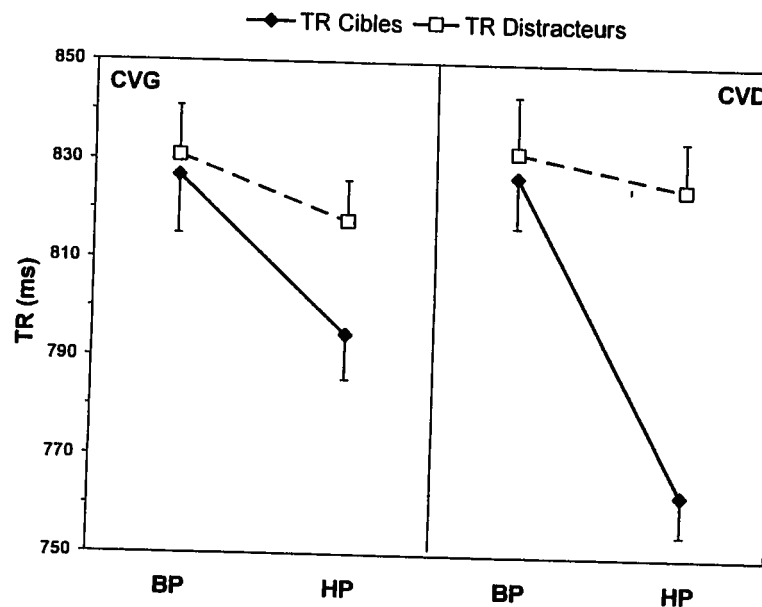


Figure 2. Pour la tâche sémantique, temps de réponse (TR) moyens aux stimuli qui sont de basse prototypicalité (BP) ou de haute prototypicalité (HP), dans le champ visuel gauche (CVG) et droit (CVD).

2.2. Effets de type et de prototypicalité des stimuli dans le CVG

Le traitement sémantique des mots isolés dans le CVG est sensible au facteur *Type* mais non à la *Prototypicalité* des stimuli. En effet, les cibles (TR = 810.71 ms) sont traitées plus rapidement [$F_{(1,124)} = 4.36$; $p < 0.05$] que ne le sont les distracteurs (TR = 831.42 ms). Par contre, il n'y a aucune différence significative en fonction du degré de la prototypicalité des stimuli [$F_{(1,124)} = 2.43$; $p > 0.05$].

Ainsi, l'HD semble subir l'influence de la manipulation du facteur *Type* des stimuli, considérant que l'HD distingue les mots présentés selon qu'il s'agit de cibles ou de distracteurs. Cela appuie l'hypothèse selon laquelle l'HD est sensible à la relation

sémantique d'appartenance catégorielle. En effet, dans le cas présent, les sujets ne doivent pas effectuer une catégorisation sémantique des mots qui leur sont présentés: ils ont à indiquer si les stimuli appartiennent ou non à la catégorie qui leur est imposée, à savoir la classe des animaux. Ainsi, l'adéquation des cibles à la catégorie définie est efficace dans le CVG. Ce n'est pas le cas pour le traitement des distracteurs qui fait appel à plusieurs classes sémantiques différentes.

2.3. Effets de type et de prototypicalité des stimuli dans le CVD

Dans le CVD, là aussi, les cibles (TR = 794.93 ms) sont traitées plus rapidement que les distracteurs (TR = 821.35 ms). De même, les stimuli dont la prototypicalité est de haut niveau (TR = 793.90 ms) sont traités plus rapidement que ceux dont la prototypicalité est plus faible (TR = 822.38 ms). Cependant, l'interaction double *Type* x *Prototypicalité* [$F_{(1,124)} = 12.87$; $p < 0.001$] oblige à décomposer l'analyse des résultats obtenus. Ainsi, il apparaît que l'effet de prototypicalité sur le TR est présent pour les cibles [$F_{(1,124)} = 20.77$; $p < 0.001$], mais non pour les distracteurs [$F_{(1,124)} = 0.27$; $p > 0.05$]. En effet, pour ce qui est de ces derniers, et même si la différence n'est pas significative sur le plan statistique, les distracteurs de basse prototypicalité (dBp; TR = 824.98 ms) associés aux cibles de basse prototypicalité (cBP), sont traités moins vite que les distracteurs de haute prototypicalité (dHP; TR = 817.71 ms) associés aux cibles de haute prototypicalité (cHP). En fait, ce type de stimuli n'est pas construit en fonction d'un degré de prototypicalité, puisque les distracteurs appartiennent à plusieurs catégories sémantiques différentes. Les distracteurs sont appariés aux cibles sur le plan de la fréquence lexicale d'usage. Par contre, pour les cibles, les cBP (TR = 827.06 ms) sont traitées plus lentement que ne le sont les cHP (TR = 762.81 ms).

Dès lors, il apparaît que l'HG est sensible à la manipulation du niveau de prototypicalité pour ce qui est du traitement des cibles mais non des distracteurs. Une explication possible de ce phénomène réside dans l'unicité de la catégorie sémantique de référence pour les cibles, ce qui n'est pas le cas des distracteurs. Par ailleurs, l'importante différence entre le TR pour les cBP *versus* les cHP, souligne la supériorité de l'HG pour le traitement des cibles dont le niveau de prototypicalité est

élevé. En effet, dans cet hémisphère, il ne faut pas considérer que le TR sera plus lent pour les stimuli plus difficiles (cBP), mais bien comme une performance accrue pour les plus faciles (cHP).

3. Performances observées aux tâches phonologique *versus* sémantique

L'analyse du traitement sémantique des mots ne montre aucune différence significative selon leur site de présentation, alors qu'il apparaît que le traitement phonologique met en lumière une asymétrie dans le profil de réponses à droite et à gauche. En accord avec la littérature, ces résultats soulignent la participation de l'HD au traitement du sens des mots mais non pas de leur phonologie. L'HG est impliqué dans les deux aspects du traitement de mots et semble exprimer sa supériorité de traitement, surtout pour les stimuli qui demandent une plus grande précision (les distracteurs dans la tâche phonologique et les cibles en sémantique).

Par ailleurs, les analyses des TR enregistrés et des taux de stimuli exclus (erreurs et TR aberrants) ne sont pas en contradiction et permettent d'affirmer que les résultats reflètent les processus langagiers étudiés et non des stratégies différentes de performance, notamment pour les stimuli les plus difficiles. Ces mots, considérés comme ayant un degré de complexité élevé, sont en effet traités plus lentement mais aussi avec plus d'exclusions.

Conclusion

Ce travail avait pour objectif principal de mieux décrire la contribution respective des deux hémisphères cérébraux au traitement de mots isolés, afin de comprendre leur rôle respectif pour les traitements phonologique et sémantique. En s'assurant de manipuler le niveau de complexité (transparence ou prototypicalité) des stimuli utilisés, il devenait possible de mieux comprendre l'implication propre de chaque hémisphère cérébral à traiter des mots sur le plan de leur forme ou de leur sens. Les résultats obtenus suggèrent entre autres que les tâches d'appariement graphophonémique et de catégorisation sémantique telles qu'utilisées ici offrent la possibilité de discriminer le rôle de chaque hémisphère cérébral dans le traitement de mots isolés.

Les résultats obtenus pour chacune des deux tâches phonologique et sémantique proposées aux sujets, vont dans le sens de ceux rapportés dans la littérature. De fait, il semble bien que les réseaux neuronaux impliqués dans le traitement de la forme des mots isolés, comme dans l'appariement graphophonémique, se limitent à l'HG, en accord avec les propositions de Beeman (1993) qui propose l'existence de différences entre les deux hémisphères pour le traitement des mots. Pour le traitement de la signification des mots, comme dans un jugement d'appartenance catégorielle, le substrat neurobiologique paraît être réparti sur les deux hémisphères. Ce dernier résultat s'inscrit dans une conception hebbienne, reprise entre autres par Pulvermüller (1999), selon laquelle les représentations lexico-sémantiques des substantifs seraient sous-tendues par des réseaux neuronaux largement distribués au niveau de chacun des deux hémisphères cérébraux.

Comme l'ont avancé Karapetsas et Andreou (2001), le traitement phonologique demandé est bien, ici aussi, l'apanage de l'HG dans le sens où ce dernier est capable de distinguer les caractéristiques propres des stimuli présentés. Ainsi, l'HG montre des dispositions certaines et spécifiques pour l'analyse de l'interférence graphophonémique, notamment en ce qui a trait aux distracteurs de la tâche phonologique utilisée ici. L'HD, quant à lui, montre une certaine disposition à effectuer la tâche demandée mais la question reste ouverte quant à son habileté à traiter la forme des mots. En effet, les stimuli présentés à l'HD ne sont aucunement différenciés, que ce soit selon leur type (cibles *versus* distracteurs) ou leur degré de complexité (transparents *versus* non transparents). Ce résultat appuie les conclusions de Abernethy et Coney (1990) qui soulignent l'aptitude de l'HD à traiter les mots présentés, sans que ce dernier n'ait accès à l'information phonologique. Il est donc difficile d'admettre la participation de l'HD au traitement de la forme des mots isolés, contrairement à son homologue gauche. Cette conclusion est encore renforcée par le fait qu'il n'y a pas de différence significative dans le taux d'erreurs produites lorsque les mots sont présentés à droite ou à gauche de l'écran. Aucun des deux hémisphères ne compense donc la nécessité d'exactitude de la réponse par la vitesse d'exécution ou vice-versa.

Tel qu'attendu, l'étude du traitement sémantique des mots isolés révèle que les deux hémisphères cérébraux sont impliqués dans une tâche de jugement d'appartenance catégorielle. La question reste ouverte quant à la nature réelle du potentiel hémisphérique droit à traiter des mots isolés sur le plan de leur signification. Les résultats obtenus dans la présente étude montrent que la contribution de chacun des deux hémisphères est différente bien qu'effective. En effet, la différence observée dans le temps de réponse global selon le site de présentation trouve une explication avec l'hypothèse de Taylor *et al.* (1999). Ces auteurs avancent que le traitement sémantique serait rapide et global dans l'HG, lent et diffus dans l'HD. Par ailleurs, il semble que l'HD puisse traiter tous les stimuli selon leur niveau de complexité tel que déterminé par leur degré de prototypicalité. Dans l'HG, cet effet du niveau de complexité ne se retrouve que pour le traitement des cibles, comme si cet hémisphère se focalisait sur une catégorie de stimuli, négligeant de tenir compte de la prototypicalité pour les stimuli qui n'appartiennent pas à la catégorie sémantique ciblée. Ceci va tout à fait dans le sens des propositions de Koivisto et Laine (1999) qui soulignent la différence de fonctionnement entre l'HG et l'HD pour le traitement des liens sémantiques catégoriels. Ainsi, si chaque hémisphère cérébral participe au traitement sémantique des mots isolés, il le fait aussi bien avec son potentiel propre qu'en relation avec le facteur lexico-sémantique utilisé.

En conclusion, la présente étude permet de mieux comprendre le rôle respectif de chacun des deux hémisphères cérébraux, en soulignant leurs habiletés communes et celles qui leur sont propres. Au cours des 150 dernières années, la question de l'asymétrie fonctionnelle du cerveau pour le langage se comprend d'ailleurs davantage en termes de complémentarité plutôt que de "dominance" (Faure et Joanette, sous presse). Il reste à préciser les rôles respectifs de chacun des deux hémisphères pour un traitement effectué en coopération, un défi auquel les approches s'appuyant sur la neuroimagerie fonctionnelle pourront certainement contribuer.

Références

- Abernethy, M., & Coney, J. (1990). Semantic and phonemic priming in the cerebral hemispheres. *Neuropsychologia*, 28, 933-945.
- Beeman, M. (1998). Coarse semantic coding and discourse comprehension. In M. Beeman & C. Chiarello (Eds.). *Right hemisphere language comprehension: Perspectives from cognitive neuroscience*. Mahwah, N.J.: Erlbaum.
- Coney, J. (1998). Hemispheric priming in a reading task. *Brain and Language*, 62, 34-50.
- Content, A., Mousty, P., & Radeau, M. (1990). Brulex, une base de données lexicales informatisée pour le Français écrit et parlé. *L'Année Psychologique*, 90, 551-566.
- Crossman, D.L., & Polish, J. (1988). Hemispheric differences for orthographic and phonological processing. *Brain and Language*, 35, 301-312.
- Day, J. (1977). Right hemisphere language processing in normal right-handers. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 3, 518-528.
- Day, J. (1979). Visual half-field word recognition as a function of syntactic class and imageability. *Neuropsychologia*, 17, 515-519.
- Drews, E. (1987). Qualitatively different organizational structures of lexical knowledge in the left and right hemisphere. *Neuropsychologia*, 25, 419-427.
- Faure, S., & Joannette, Y. (sous presse). Hémisphère droit, hémisphère gauche et cognition: latéralisation, latéralité et coopération inter-hémisphérique. In B. Lechevalier, F. Eustache & F. Viader (Eds.). *Traité de neuropsychologie*. Bruxelles: De Boek.
- Hines, D. (1976). Recognition of verbs, abstract nouns and concrete nouns from the left and the right visual fields. *Neuropsychologia*, 14, 211-216.
- Joannette, Y., Goulet, P., & Hannequin, D. (1990). *Right hemisphere and verbal communication*. New York: Springer Verlag.
- Karapetsas, A., & Andreou, G. (2001). Visual field asymmetries for rhyme and semantic tasks in fluent and nonfluent bilinguals. *Brain and Language*, 78, 53-61.

- Khateb, A., Pegna, A.J., Michel, C.M., Custodi, M.C., Landis, T., & Annoni, J.M. (2000). Semantic category and rhyming processing in the left and right cerebral hemisphere. *Laterality*, 5, 35-53.
- Koivisto, M. (1998). Categorical priming in the cerebral hemispheres: automatic in the left, postlexical in the right hemisphere? *Neuropsychologia*, 36, 661-668.
- Koivisto, M., & Laine, M. (1999). Strategies of semantic categorization in the cerebral hemispheres. *Brain and Language*, 66, 341-357.
- Oldfield, O.D. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh Inventory. *Neuropsychologia*, 9, 97-113.
- Pulvermüller, F. (1999). Words in the brain's language. *Behavioral and Brain Sciences*, 22, 253-336.
- Rayman, J., & Zaidel, E. (1991). Rhyming and the right hemisphere. *Brain and Language*, 40, 89-105.
- Sergent, J. (1994). Les dilemmes de la gauche et de la droite. Opposition, cohabitation ou coopération? In X. Seron (Ed.). *Psychologie et cerveau*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Taylor, I., & Taylor, M.M. (1983). *The psychology of reading*. New York: Academic Press.
- Taylor, K., Brugger, P., Weniger, D., & Regard, M. (1999). Qualitative hemispheric differences in semantic category matching. *Brain and Language*, 70, 119-131.
- Walter, N., Cliche, S., Beauregard, M., & Joanette, Y. (2001). Grapheme-phoneme processing of single words. *Brain and Cognition*, 46, 295-299.

Annexe: Pourcentage moyen de stimuli exclus pour les tâches phonologique et sémantique.

Tâche phonologique: appariement graphophonémique							
	Dans le CVG			Dans le CVD			% total [CVG,CVD]
	NT	T	% [NT,T]	NT	T	% [NT,T]	
Cibles	27.44	24.91	26.17	18.25	15.72	16.98	21.58
Distracteurs	27.06	16.03	21.55	24.13	13.88	19.00	20.27

Tâche sémantique: jugement d'appartenance catégorielle							
	Dans le CVG			Dans le CVD			% total [CVG,CVD]
	BP	HP	% [BP,HP]	BP	HP	% [BP,HP]	
Cibles	28.53	19.03	25.28	12.69	23.78	18.98	21.38
Distracteurs	21.69	20.31	21.50	18.25	21.00	19.88	20.44

CVG: champ visuel gauche; CVD: champ visuel droit; NT: non transparent; T: transparent;
BP: basse prototypicalité; HP: haute prototypicalité.

Chapitre 4

ÉTUDES EN IMAGERIE PAR RÉSONANCE MAGNÉTIQUE FONCTIONNELLE (IRMf)

Étude 4

Phonological and semantic processing on single words: an fMRI study
[sounise]

67

Étude 5

*More difficult does not necessarily mean more brain: fMRI correlates of
distinct levels of difficulty for phonological and semantic processing of
words in normal subjects*
[1998, Brain and Language, 65, 90-92]

90

Étude 4

PHONOLOGICAL AND SEMANTIC PROCESSING ON SINGLE WORDS: AN fMRI STUDY

Nathalie WALTER, Mario BEAUREGARD,
Ana Inés ANSÁLDO & Yves JOANETTE

SOUMISE

Abstract	68
Introduction	69
Methods	72
Subjects	72
Tasks and Materials	72
Procedure	72
Data acquisition	74
Data analysis	74
Results	76
1. Behavioral data	76
2. fMRI data	76
Discussion	79
References	85

Abstract

The right hemisphere (RH) and the left hemisphere (LH) are known to have distinct roles in word processing. Various approaches have demonstrated that the LH is the one which supports the phonological processing of single words, while the RH appears to be also involved in their semantic processing. The purpose of this study is to confirm and extend the respective role of each hemisphere in phonological and semantic processing using combined behavioral and fMRI approaches. Fourteen young right-handed women contributed to the study. They performed three tasks: (a) a grapheme-phoneme matching task (phonological processing); (b) a category judgment task (semantic processing); (c) a case judgment task serving as a reference task. Each activation task included two levels of difficulty. Difficulty was determined based on the grapheme-phoneme transparency of stimuli in the phonological task, and the prototypicality of stimuli in the semantic task. Response times (RTs) were recorded simultaneously with fMRI acquisition. In the phonological task, RTs were longer for non-transparent stimuli than for transparent ones. In the semantic task, low-prototypicality stimuli were processed slower than high-prototypicality stimuli. Moreover, regions activated during the phonological task included the left inferior frontal gyrus and the left middle temporal gyrus. During semantic processing, the left and right inferior frontal gyri, the left middle frontal gyrus and the left fusiform gyrus were activated. No significant difference in brain activation was found between the two levels of difficulty in either task. It therefore appears that phonological processing exerts greater demands upon the LH than semantic processing, which in turn requires greater involvement by both hemispheres.

Aknowledgments.

We wish to thank Zofia Laubitz for helping us revise the manuscript. This research was supported by grants from the CIHR (Canadian Institutes of Health Research) (no. MOP-15006) and from the Heart and Stroke Foundation of Canada (no. YJ-13-FMCQ) to YJ.

Introduction

Since the introduction of neuroimaging techniques, there have been numerous studies of the pattern of brain activation for phonological *versus* semantic processing of words; nevertheless, few of these studies compared these two types of word processing in the same individuals. Semantic (or meaning-based) and phonological (or sound-based) processing constitute two basic components of word processing. The two tasks used in this study are a grapheme-phoneme matching task for phonological processing, and a category judgment task for semantic processing.

Areas of brain activation during phonological word processing have been found consistently in the left hemisphere, notably in the superior and middle temporal gyri (Petersen *et al.*, 1989; Binder, 1997). The inferior frontal gyrus and adjacent areas are also involved in phonological processing (e.g., Petersen & Fiez, 1993), especially for the maintenance of phonological information (e.g., rhyme judgment). Contrary to the traditional neuropsychological model of language representations (e.g., Caplan, 1994), some positron emission tomography (PET) studies have revealed that posterior temporal regions, including Wernicke's area and the supramarginal gyrus (Petersen *et al.*, 1989; Démonet *et al.*, 1994; Zatorre *et al.*, 1996), are involved in phonological processing. These regions may underlie the translation of orthographic symbols to phonemic representations (e.g., Xu *et al.*, 2001), but there is evidence that they play a role in phonological processing that is independent of this translation process (e.g., Démonet *et al.*, 1994). Several studies have examined phonological word processing as it affects specific brain regions. For example, the role of the frontal regions has often been debated. Evidence from rhyme judgment or generation tasks (Cuenod *et al.*, 1995; Xu *et al.*, 2001) indicates that the inferior frontal gyrus is involved in phonological processing. In addition, neighboring premotor areas may play a role in processing that is phonology-dependent (e.g., Price *et al.*, 1994). However, Poldrack *et al.* (1999) suggested that the frontal areas implicated in phonological processing were also activated in a semantic task. Differences in the results of different studies may be partly attributable to variations in experimental tasks (e.g., rhyming with pictures *versus* syllable segmentation), baseline conditions (e.g., rest *versus* feature detection or word repetition), presentation rate (>2 seconds for most imaging studies)

and degree of stimulus constancy across experimental conditions (e.g., Price *et al.*, 1997). These differences may also indicate a failure to isolate phonological processes from other cognitive processes in various experimental tasks (Xu *et al.*, 2001). However, regarding the process of translation from orthographic to phonological form, numerous studies have shown the implication of regions in and around Wernicke's area, including the supramarginal gyrus, the angular gyrus and the cerebellum (Small *et al.*, 1996; Petersen *et al.*, 1990; Pugh *et al.*, 1996). In summary, the brain areas involved in phonological processing are essentially located in the frontal and parietal regions of the left hemisphere.

Unlike phonological processing, the activation pattern for semantic processing is characterized by its bilaterality and by a wider distribution of the brain regions involved. Thus, various studies have emphasized the role of the frontal area, using different experimental paradigms such as an abstract/concrete semantic judgment (e.g., Demb *et al.*, 1995; Gabrieli *et al.*, 1996) or a fluency task (e.g., Cuenod *et al.*, 1995; Phelps *et al.*, 1997; Schlosser *et al.*, 1998; Weiller *et al.*, 1995). The frontal brain areas involved essentially correspond to the inferior frontal gyri (Demb *et al.*, 1995; Cuenod *et al.*, 1995; Ojemann *et al.*, 1998; Desmond *et al.*, 1998) and notably Broca's area (Weiller *et al.*, 1995). However, the whole frontal lobe appears to be involved in the semantic processing (Gernsbacher & Kaschak, 2003). Among the different types of semantic processing looked at, the abstract/concrete semantic judgment task showed a temporal activation as well. For example, Friederici *et al.* (2000) reported activation in the posterior part of the left middle/superior temporal gyrus. Moreover, Devlin *et al.* (2002) noticed that the right antero-middle temporal pole was commonly activated in tasks requiring the semantic processing of written words. The cerebellum has also been reported to be activated during both phonological and semantic tasks (Leiner *et al.*, 1995; Fiez, 1996). Desmond *et al.* (1998) hypothesized that the cerebellum may play a role in maintaining effortful cognitive activity, although the mechanism whereby this is done remains obscure. In summary, for the semantic processing of words, brain activation is probably more widely distributed, not only in the left hemisphere but also in the right hemisphere.

It should be noted that many of the above-mentioned studies show that some brain regions are involved in phonological as well as semantic processing. Pulvermüller (1999) introduced an original theory of word structure in the brain, which attempts to account for both phonological and semantic processing. According to this author, words are Hebbian cell assemblies that link orthographic, phonological, and meaning-specific information and their representations are distributed in step with their features. For instance, Pulvermüller (1999) proposed that phonological word-form representations were found in the temporal regions.

In summary, the lesion studies and most of the functional imaging studies suggest that the cerebral regions involved differ for phonological and semantic word processing. In particular, it has been shown that the phonological processing of words induces essentially left-hemispheric activation whereas semantic word processing produces more bilateral activation, including right-hemisphere structures (e.g., Démonet *et al.*, 1994; Price *et al.*, 1997). However, most studies reported in the literature have constrained themselves to specific brain regions (e.g., the left inferior frontal gyrus: Poldrack *et al.*, 1999; Hugdahl *et al.*, 1999; Bookheimer, 2002) or to some specific population (e.g., bilinguals: Pillai *et al.*, 2003; dyslexic children: Pugh *et al.*, 2001). Moreover, only a few studies have looked at the phonological and semantic processing of words in the same undamaged brain. Thus, the goal of this study was to explore the neurological correlates of the phonological and semantic processing of words within the same participants. Two levels of difficulty of each task were used in order to be sure that the tasks were really addressing phonological or semantic processing, and to control for possible ceiling/floor effects. The hypotheses were that the regions involved in phonological processing are essentially circumscribed within the left hemisphere, while semantic processing activates regions dispersed among both cerebral hemispheres.

Methods

Participants

Fourteen right-handed females (age range: 19 to 27, mean age: 20.0) participated in this study. All were native French speakers, without neurological or psychiatric diseases, and had normal or corrected-to-normal vision. Their mean laterality quotient on the Edinburgh Inventory (Oldfield, 1971) was +82% (range: 60% to 100%).

Tasks and Materials

Three different tasks were used, two activation tasks and one reference task. The first activation task required the phonological processing of single words (grapheme-phoneme matching for the sound /o/) and the second one involved their semantic processing (semantic category judgment for "animals"). The materials for both tasks consisted of 128 French words, divided into targets and distractors, with 4 to 9 letters each. For each of these two tasks, the level of difficulty was varied, based on (a) orthographic/phonological transparency for the phonological task, i.e., the presence or absence of the letter "o" in the target, and (b) prototypicality of the target in the semantic category task. The distractors were strictly paired with the targets in terms of length and frequency. The third task was a letter-case judgment on non-words (consonant strings), with 128 stimuli (see table 1).

Table 1. Type of stimuli used in the three tasks.

	Type of stimuli	
	Targets	Distractors
Phonological task		
Non-transparent stimuli	NTT: nausée ("nausea")	NTD: comte ("count")
Transparent stimuli	TT: rosaire ("rosary")	TD: valise ("bag")
Semantic task		
Low-prototypicality stimuli	LPT: hareng ("herring")	LPD: lavette ("mop")
High-prototypicality stimuli	HPT: dauphin ("dolphin")	HPD: alcool ("alcohol")
Reference task	ldhxc	BFTXDJV

Procedure

The stimuli were generated by a computer running E-Prime and presented visually to the subjects in their central visual field. They were projected into the scanner via a pair of hood-mounted goggles (Resonance Technology Inc., St. Northridge, CA). The

stimuli were projected for 1500 ms, in a pseudo-random order. The phonological task required subjects to indicate whether the stimulus seen contained the sound /o/ or not. The semantic task required subjects to judge whether the stimulus presented was the name of an animal or not. The reference task, which served as a baseline, required subjects to decide whether the item was written in lowercase or not. Subjects were instructed to answer as quickly and accurately as possible by pressing one of two buttons (yes/no) on a five-key response pad (E-Prime & MR compatible). Half of the subjects answered yes with their index finger and the other half with their middle finger.

The experiment was based on a block design with two runs, one in which phonological and reference tasks alternated, and the other one in which semantic and reference tasks alternated. Each run comprised 147 volumes and the first three volumes were excluded (see Figure 1). The duration of each block was 27 seconds and the total duration of one run was 7 minutes 21 seconds.

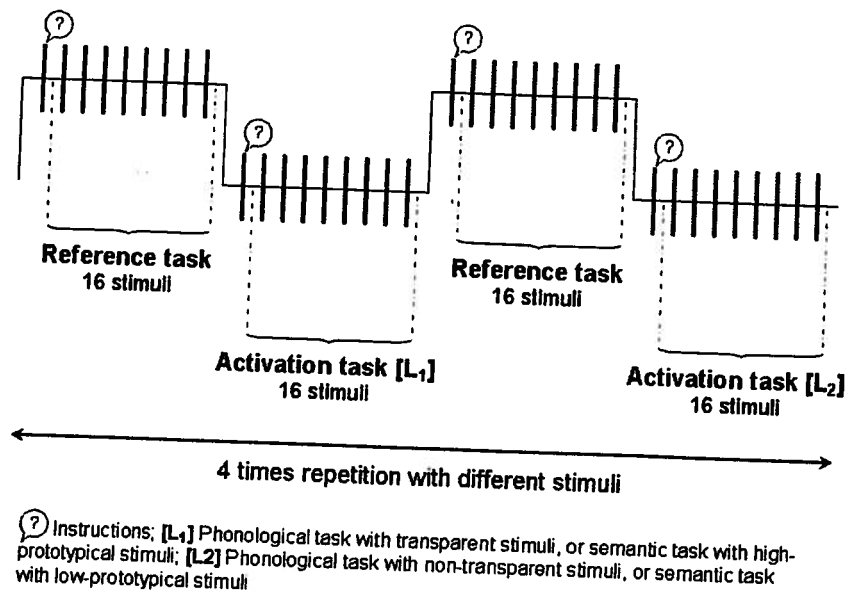


Figure 1. The block-design paradigm used in this study. The first volume of each epoch was deleted because it corresponded to the instructions for the task in question. Runs and epochs were attributed to subjects based on a pseudo-random order.

The order of the tasks and the scans in the session was counterbalanced across subjects. Response times (RTs) were recorded while the fMRI acquisition was carried out.

Data acquisition

Echoplanar images (EPI) were acquired on a 1.5-Tesla system (Magnetom Vision, Siemens Electric, Erlangen, Germany). Twenty-eight slices (5 mm thick) were acquired every 2.65 seconds in an inclined axial plane, aligned with the anterior commissure–posterior commissure axis. These T2*-weighted functional images were acquired using an EPI pulse sequence (time to repetition [TR] = 0.8 ms, time to echo [TE] = 54 ms, Flip = 90°, field of view [FOV] = 215 mm, Matrix = 64 x 64). Following functional scanning, high-resolution data were acquired via a T1-weighted, three-dimensional volume acquisition obtained using a gradient echo pulse sequence (TR = 9.7 ms, TE = 4 ms, Flip = 12°, FOV = 250 mm, Matrix = 256 x 256).

Data analysis

The behavioral data analysis consisted of item analyses which were carried out on the dependent variable: RTs in milliseconds. The independent variables considered were (1) *Type* of stimuli (target or distractor), and (2) *Transparency* of stimuli (transparent or not transparent) for the phonological task or *Prototypicality* of the stimulus (high-prototypicality or low-prototypicality) for the semantic task. All analyses were done using an ANOVA with two factors, namely *Type x Transparency* for the phonological task and *Type x Prototypicality* for the semantic task. Simple effects analysis was done to break up the significant interactions, using BMDP 2.0 software. Data were analyzed using Statistical Parametric Mapping software (SPM99, Wellcome Department of Cognitive Neurology, London, UK) implemented in Matlab (Mathworks Inc., Sherborn, MA, USA). Images for all subjects were realigned to correct for artifacts due to small head movements and spatially normalized (voxel size: 3 x 3 x 5 mm) in an MRI stereotaxic space (Talairach & Tournoux, 1988). Images were then convolved in space with a three-dimensional isotropic gaussian kernel (12 mm full-width half-maximum) to improve the signal-to-

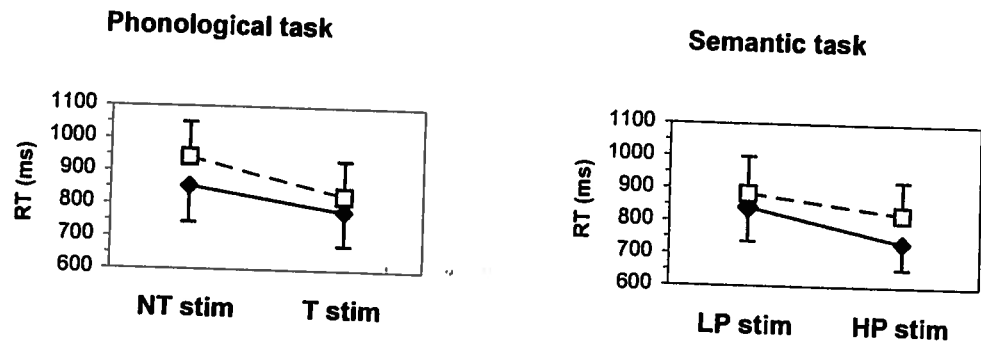
noise ratio and to accommodate for residual variations in functional neuroanatomy that usually persist between subjects after spatial normalization.

For statistical analyses, the block design was convolved with a hemodynamic response function that approximated the activation patterns. The SPM99 high-pass filter was used to remove any possible effects of low-frequency changes. Effects at each and every voxel were estimated using the general linear model. Voxel values for this contrast yielded statistical parametric maps of the t statistic (SPM t), subsequently transformed to the unit normal distribution (SPM Z). For phonological processing, a “random-effects model” was implemented to contrast the brain activity associated with the grapheme-phoneme matching task *versus* those associated with the letter-case judgment [Phonological-Reference]. For semantic processing, the same model was used to contrast brain activities associated with the category judgment task and that associated with the letter-case judgment [Semantic-Reference]. An *a priori* search strategy was used and a small volume correction was performed in the brain regions of interest (ROIs) defined *a priori*. Several brain regions were found to be activated reasonably consistently in previous neuroimaging studies of phonological and semantic processing (for a review, see Bookheimer, 2002; Gernsbacher & Kaschak, 2003). For the [Phonological-Reference] contrast, the search strategy encompassed the frontal gyri, the superior and middle temporal gyri, as well as the fusiform and supramarginal gyri in the left hemisphere. For the [Semantic-Reference] contrast, the same brain regions were included bilaterally (except for the supramarginal gyrus). The search volume corresponding to the ROIs was defined *a priori* by tracing the neuroanatomical boundaries of these regions on the MR reference image (MNI template), using small volume correction (SVC) and box volume function in SPM99. For this *a priori* search, a corrected probability threshold for multiple comparisons of $p < .05$ corrected was used. Only clusters showing a spatial extent of at least five contiguous voxels were kept for image analysis.

Results

1. Behavioral data

The patterns of RTs were very similar in both tasks (see Figure 2): targets were always processed faster than distractors, in the phonological processing [$F_{(1,48)} = 5.21$, $p < .05$] and semantic tasks [$F_{(1,48)} = 5.21$, $p < .05$].



NT stim: non-transparent stimuli; T stim: transparent stimuli;
LP stim: low-prototypicality stimuli; HP stim: high-prototypicality stimuli.

Figure 2. RTs for phonological and semantic tasks. Targets are symbolized by black diamonds and an unbroken line, distractors by white squares and a dotted line.

In both tasks, the difficulty effect was statistically significant. The transparent stimuli (RT = 802.66 ms) were processed faster [$F_{(1,48)} = 10.17$, $p < .01$] than the non-transparent stimuli (RT = 897.77 ms) in the phonological task. Likewise, the high-prototypicality stimuli (RT = 779.09 ms) were processed faster [$F_{(1,48)} = 8.71$, $p < .01$] than the low-prototypicality stimuli (RT = 862.41 ms) in the semantic task.

2. fMRI data

Although the behavioral patterns in terms of RTs were similar for both phonological and semantic processing, the fMRI results differed according to the nature of the processing. The comparison between phonological and reference tasks [Phonological-Reference] showed statistically significant cerebral activation in the right cerebellum, the left middle temporal gyrus, the left middle frontal gyrus and the left superior parietal lobule. On the contrary, in the comparison between semantic and reference tasks [Semantic-Reference], the only statistically significant cerebral activation was localized in the right cerebellum. Subsequent analysis with a SVC in the ROIs was

done using boxes built around a given central point (calculated from the atlas coordinates of Talairach & Tournoux, 1988). The results revealed a significant activation in the left inferior frontal gyrus and the left middle temporal gyrus for [Phonological-Reference] (see table 2).

Table 2. Cerebral activations with SVC for phonological processing.




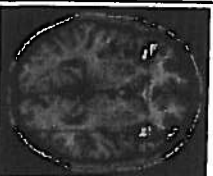


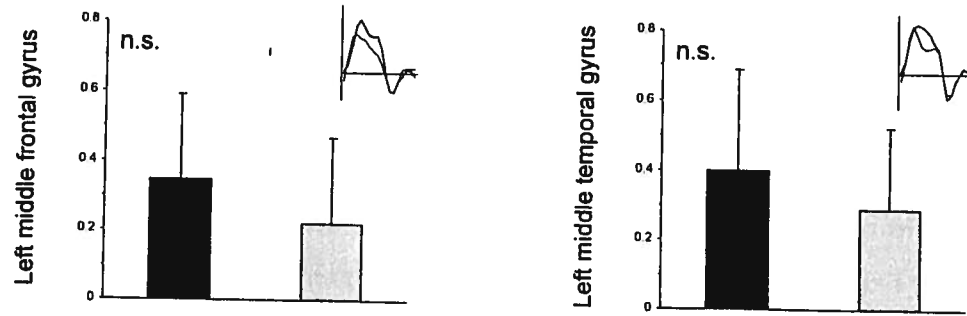
	cluster-level			voxel-level			
	P_{corr}	k_E	P_{uncorr}	P_{corr}	T	z	P_{uncorr}
	0.000	262	0.000	0.011	6.09	4.12	0.000
	left inferior frontal gyrus [-48 35 7]						
	0.000	254	0.000	0.000	9.65	5.14	0.000
	left middle temporal gyrus [-50 -56 -7]						

Table 3. Cerebral activations with SVC for semantic processing.

	cluster-level			voxel-level			
	P_{corr}	k_E	P_{uncorr}	P_{corr}	T	z	P_{uncorr}
	0.000	493	0.000	0.003	7.18	4.49	0.000
	left inferior frontal gyrus [-48 24 13]						
	0.000	403	0.000	0.005	6.73	4.34	0.000
	right inferior frontal gyrus [42 29 1]						
	0.000	470	0.000	0.004	7.33	4.53	0.000
	left middle frontal gyrus [-36 7 25]						
	0.000	470	0.000	0.004	7.33	4.53	0.000
	left fusiform gyrus [-45 -50 -18]						

Analysis with SVC showed a significant activation in the left inferior frontal gyrus, the right inferior frontal gyrus, the left middle frontal gyrus and the left fusiform gyrus for [Semantic-Reference] (see table 3).

Phonological processing



Semantic processing

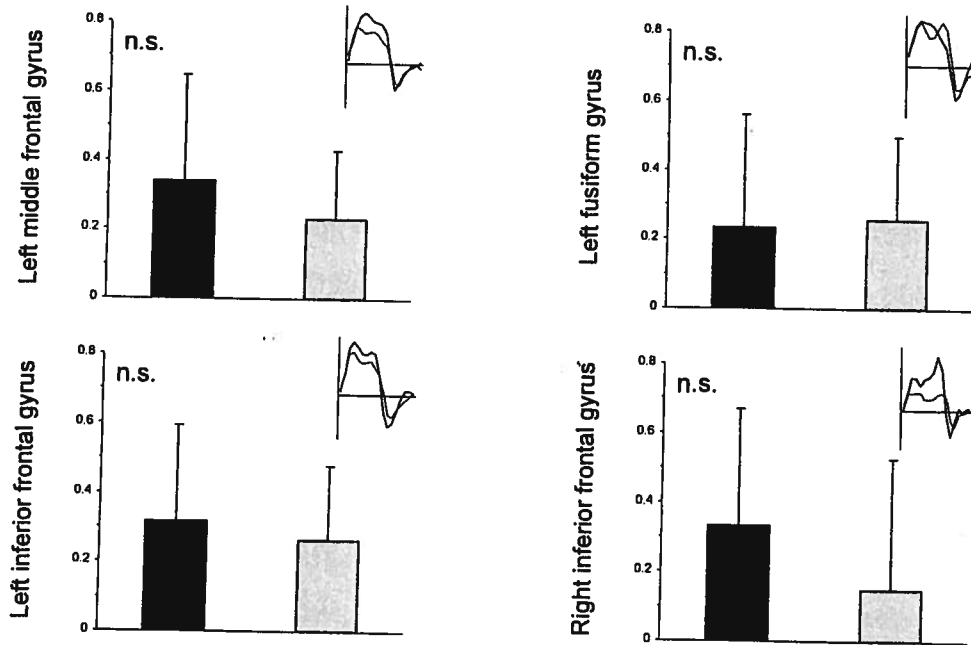


Figure 3. Comparison of mean BOLD response in different brain areas for (1) the phonological task, according to the level of difficulty (transparency) of the stimuli, and (2) the semantic task, according to the level of difficulty (prototypicality) of the stimuli. The dark histogram and the thicker curve correspond to the stimuli with a high level of difficulty: non-transparent or low-prototypicality words. The gray histogram and the thinner curve correspond to the stimuli with a low level of difficulty: transparent or high-prototypicality words.

The comparisons according to the level of difficulty of the stimuli showed no statistically significant activation, either for phonological or for semantic processing (see figure 3). However, there was a significant difference in RT depending on the level of difficulty of the stimuli. Furthermore, the time-course of the hemodynamic response with either type of stimuli was different (see figure 3).

Discussion

The aim of this study was to explore the neurobiological correlates of phonological and semantic word processing within a single group of participants. Two tasks were used with two levels of stimulus difficulty: (1) a grapheme-phoneme matching task for the exploration of word form, with the manipulation of the stimuli's transparency, and (2) a category judgment task for the exploration of word meaning, with the manipulation of the stimuli's prototypicality. Behavioral data and cerebral activation patterns were simultaneously recorded.

The main behavioral results show that targets are always processed more quickly than distractors, in the two types of used tasks. The transparent words (e.g., *rosaire* and *balise*) are processed more quickly than the non-transparent words (e.g., *nausée* and *comte*) in the grapheme-phoneme matching task. Likewise, the high-prototypicality words (e.g., *dauphin* and *alcool*) are processed faster than the low-prototypicality words (e.g., *hareng* and *lavette*). In other words, behavioral data underline the stimulus type effect (targets versus distractors), the graphophonemic transparency effect (transparent versus non-transparent stimuli) and the prototypicality effect (high-prototypicality versus low-prototypicality words). These results confirm those obtained in an earlier study (Walter et al., 2003), undertaken in the divided visual field condition, using exactly the same tasks and stimuli.

The pattern of cerebral activation acquired during the grapheme-phoneme matching task includes the right cerebellum as well as the middle temporal gyrus, the middle frontal gyrus and the superior parietal gyrus in the left hemisphere. The fMRI analysis according to the ROIs (which are described above) reveals a robust activation of the left inferior frontal gyrus and left middle temporal gyrus.

These results are in line with previous studies that focused on phonological processing, using a wide variety of tasks. Thus, activation in the left inferior frontal gyrus was reported by Poldrack et al. (2001) and Xu et al. (2001), who examined young non-brain damaged subjects with a rhyme judgment task, the former researchers using fMRI and the latter PET. In another study, Cuenod et al. (1995) reported very robust activation in the left inferior frontal gyrus with a verbal fluency task with formal criteria. Cuenod et al. (1995) used twelve different formal criteria, with high- and low-productivity letters, including vowels. In this regard, it should be noted that rhyme judgment, verbal fluency with formal constraints, and the task used in the present study (grapheme-phoneme matching) requires the phonological analysis of the word in order to scan for the presence of a particular phoneme. It is possible that the left inferior frontal gyrus may participate in processing the phonological features of the stimuli, specifically when very fine processing is required.

With regard to the activation in the left middle temporal gyrus, the results reported in this paper are in line with previous studies on written word recognition. Specifically, Small et al. (1996) asked their subjects to read words aloud and produce the word "range" when the letter string presented did not correspond to a real word. The authors argued that the activation in the left middle temporal gyrus was related to the visual input lexicon (Small et al., 1996). In our study, it is quite certain that the participants had to access the visual lexicon to complete the task, and this may explain the activation in the left middle temporal gyrus. However, in order to perform the grapheme-phoneme task, additional processing is required; more specifically, this task requires associating the visual form of the word with its corresponding phonological structure.

Pugh et al. (1996) also found an activation in the left middle temporal gyrus, but this time using a visual rhyme judgment task with pseudo-words. Interestingly, Pugh et al. (1996) argue that this type of task forces participants to explicitly use their knowledge of grapheme-phoneme correspondences in order to generate phonological representations. Furthermore, they were careful to choose pairs in which the targets rhymed but their spelling was quite dissimilar. In line with these findings (Pugh et al.,

1996), the experimental task used in the present study required the subjects to match the target phoneme (i.e., /o/) with two possible graphemic correspondents (i.e., “o,” “au”). In summary, the results obtained in our study indicate that the left inferior frontal gyrus and the left middle temporal gyrus participate in the processing of grapheme-phoneme matching, even in cases when constraints are imposed on this processing.

Apart from the main activations described above, some other areas of activation were observed. More specifically, there were activations in the left middle frontal gyrus and widespread activation in the right cerebral hemisphere. With regard to the activation in the middle frontal gyrus, the spatial proximity of this region and the left inferior frontal gyrus may explain an activation which is found only when ROIs analyses were not used. An alternative explanation could be that the participants subvocalized the word in order to scan for the target sound, and this activated a region which is known to be related to oral word production (Gernsbacher & Kaschak, 2003).

Concerning the semantic task (i.e., category judgment task), the pattern of activation is bilateral, and less localized than with the grapheme-phoneme matching task. In fact, the results obtained with an ROI analysis showed an activation in the left middle frontal gyrus and both the left and right inferior frontal gyri. In line with these results, previous studies (Hugdahl et al., 1999) found an activation of the left middle frontal gyrus with a covert semantic categorization task. The only difference between Hugdahl et al.’s task (1999) and ours is that Hugdahl et al. required subjects to classify words within three possible categories, whereas in our study there was only one possible category: animals. Several studies have reported activations in the inferior frontal gyrus with semantic category tasks. As in the present study, some of them found activations in both the left and right inferior frontal gyri (Devlin et al., 2002; Pilgrim et al., 2002) whereas others have found a unilateral activation in left inferior frontal gyrus (Poldrack et al., 1999). Interestingly, the results of the present study are in line with those in which a semantic category task was used (Devlin et al., 2002; Pilgrim et al., 2002). Conversely, activation of the left inferior frontal gyrus

alone was found with tasks that required discriminating between abstract and concrete words, and not semantic category judgment (Poldrack et al., 1999).

With regard to the activation in the left fusiform gyrus, previous studies (Thompson-Schill et al., 1999; D'Esposito et al., 1997) found similar activations in tasks that require processing of visual mental imagery. In this regard, the nature of the present semantic judgment task may favor such processing. Hence, the fact that the target category was "animal" may have facilitated the engagement of visual mental imagery processing to perform the task, which in turn, activated the left fusiform gyrus.

Furthermore, there was also an activation in the right anterior portion of the vermix. This cerebellar activation was observed both with the grapheme-phoneme matching task and the category judgment task. Long considered to have a role limited largely to motor-related functions, the cerebellum is now known to be involved in both perceptual and cognitive processes (Fulbright et al., 1999). More specifically, the right cerebellum is thought to be involved in the strategic control of semantic retrieval and response selection (Noppeney et al., 2002), or required by the additional working memory, attentional, and semantic demands of categorization tasks (Devlin et al., 2002). Moreover, Fulbright et al. (1999) showed that the cerebellum may contribute to both phonological and semantic processing. They reported an activation in the right cerebellum both following the use of a categorization task and of a rhyme judgment task. In summary, the cerebellum seems to play a role in linguistic processing, but its contribution needs to be specified, particularly with regard to the role of its anatomical links with the frontal lobe (Marien et al., 2001).

One of the aims of this study was to examine the impact of different levels of difficulty in word processing. For this purpose, the stimuli were either transparent or not (grapheme-phoneme matching task), and high- or low-prototypicality (category judgment task). The results showed that response times were longer for non-transparent and low-prototypicality words than for transparent and high-prototypicality words. On the other hand, the fMRI data showed no significant activation related to the contrasts between the two levels of difficulty in either task. One possible explanation of these findings is that the regions that participate in the

phonological and semantic processing of stimuli are the same, regardless of level of difficulty. However, this does not preclude the possibility that there is a differential pattern within the links among those regions. Functional connectivity analyses could provide relevant information on the nature of those links, depending on the level of difficulty of the task (Friston et al., 1996). Furthermore, the fact that the time-course of the hemodynamic response varied depending on the level of difficulty of the stimuli suggests that the temporal dimension is an important one.

Another perspective from which the results of the present study can be discussed concerns the regions that were activated in both experimental tasks. Specifically, the left inferior frontal gyrus was activated during both the grapheme-phoneme matching task and the category judgment task. The literature shows that the left inferior frontal gyrus plays a critical role in these levels of language processing. Thus, Ojemann et al. (1989) found electrophysiological activity in the frontal areas, with both semantic processing and phonological processing. Furthermore, they reported that this frontal activity could be unilateral or bilateral, depending on the task (i.e., verbal fluency task with either phonological or semantic criteria) and the handedness of the participants. In the past ten years, an increasing number of brain imaging studies have reported activations in the left inferior frontal gyrus during language tasks (see Bookheimer, 2002, for a review). Using PET, Bookheimer et al. (1995) reported activation of Broca's area during silent and oral word reading. These authors also reported activation in the left inferior frontal gyrus, with both silent and oral word reading tasks. However, this activation was significantly greater with the silent reading task (Bookheimer et al., 1995). In line with these results, it is possible that the left inferior frontal gyrus activation reported in our study resulted from the fact that both experimental tasks required silent reading. Furthermore, with the grapheme-phoneme matching task, the subjects reported that they would "say the word in their head," in order to scan for the target phoneme. In this sense, the nature of the experimental tasks used in the present study favored left inferior frontal gyrus activation in two ways: silent word reading, required with the semantic task, and both silent reading and reading aloud "in the head," required with the grapheme-phoneme matching task. With regard to fMRI studies, convergent evidence concerning the role

of the left inferior frontal gyrus with semantic and phonological processing tasks has been reported. Thus, Poldrack et al. (1999) reported an activation in the left inferior frontal cortex during semantic and phonological judgment tasks. Furthermore, in an fMRI study, McDermott et al. (2003) reported an activation in the left inferior frontal gyrus; interestingly, the authors used the same types of tasks used in the present study: a semantic category task and a rhyme judgment task.

In conclusion, the results of this study show that a number of regions were activated during the semantic and phonological tasks; these regions included the left inferior frontal gyrus and the middle temporal gyrus, for the phonological judgment task, and the left and right inferior frontal gyri, the left middle frontal gyrus, and the left fusiform gyrus, for the semantic category task. Furthermore, at least one region was activated during both tasks: the left inferior frontal gyrus. The role of the left inferior frontal gyrus in oral word production is well known (Bookheimer 2002). However, this area is also activated during tasks that require phonological processing without oral output (e.g., grapheme-phoneme matching task in the present study). Moreover, the left inferior frontal gyrus is activated during semantic processing tasks as well. In summary, the left inferior frontal gyrus seems to be at the crossroads of many language processing abilities. Thus, it is possible that this area is a central part of a complex network subserving language processing. Furthermore, given the fronto-cerebellar connections, it is not surprising that the activations reported in the present study include the cerebellum as well. As suggested by Gabrieli et al. (1998), activation in the inferior frontal gyrus reflects functional activity in the regions that are specific to aspects of language processing other than verbal output. Future studies using functional connectivity analyses, and approaching the issue of the neural basis of language processing by means of different and complementary methods (e.g., EEG, fMRI and divided visual field presentations), will clarify the role of the inferior frontal gyrus and explore the nature of the network that subserves single word processing.

References

- Binder, J.R. (1997). Neuroanatomy of language processing studied with functional MRI. *Clinical Neuroscience*, 4, 87-94.
- Bookheimer, S. (2002). Functional MRI of language: new approaches to understanding the cortical organization of semantic processing. *Annual Review of Neuroscience*, 25, 151-188.
- Bookheimer, S.Y., Zeffiro, T.A., Blaxton, T., Gaillard, T., & Theodore, W. (1995). Regional cerebral blood flow during object naming and word reading. *Human Brain Mapping*, 3, 93-106.
- Caplan, D. (1994). Language and the brain. In M.A. Gernsbacher (Ed.) *Handbook of Psycholinguistics*. San Diego (CA): Academic Press.
- Cuenod, C.A., Bookheimer, S.Y., Hertz-Pannier, L., Zeffiro, T.A., Theodore, W.H., & Le Bihan, D. (1995). Functional MRI during word generation, using conventional equipment: a potential tool for language localization in the clinical environment. *Neurology*, 45, 1821-1827.
- Demb, J.B., Desmond, J.E., Wagner, A.D., Vaidya, C.J., Glover, G.H., & Gabrieli, J.D. (1995). Semantic encoding and retrieval in the left inferior prefrontal cortex: a functional MRI study of task difficulty and process specificity. *Journal of Neuroscience*, 15, 5870-5878.
- Démonet, J.F., Price, C., Wise, R., & Frackowiak, R.S. (1994). Differential activation of right and left posterior sylvian regions by semantic and phonological tasks: a positron-emission tomography study in normal human subjects. *Neuroscience Letter*, 182, 25-28.
- Desmond, J.E., Gabrieli, J.D., & Glover, G.H. (1998). Dissociation of frontal and cerebellar activity in a cognitive task: evidence for a distinction between selection and search. *NeuroImage*, 7, 368-376.
- D'Esposito, M., Detre, J.A., Aguirre, G.K., Stallcup, M., Alsop, D.C., Tippet, L.J., & Farah, M.J. (1997). A functional MRI study of mental image generation. *Neuropsychologia*, 35, 725-730.

- Devlin, J.T., Russell, R.P., Davis, M.H., Price, C.J., Moss, H.E., Fadili, M.J., & Tyler, L.K. (2002). Is there an anatomical basis for category-specificity? Semantic memory studies in PET and fMRI. *Neuropsychologia*, 40, 54-75.
- Devlin, J.T., Russell, R.P., Davis, M.H., Price, C.J., Moss, H.E., Fadili, M.J., & Tyler, L.K. (2002). Is there an anatomical basis for category-specificity? Semantic memory studies in PET and fMRI. *Neuropsychologia*, 40, 54-75.
- Fiez, J.A. (1996). Cerebellar contributions to cognition. *Neuron*, 16, 13-15.
- Friederici, A.D., Opitz, B., & von Cramon, D.Y. (2000). Segregating semantic and syntactic aspects of processing in the human brain: an fMRI investigation of different word types. *Cerebral Cortex*, 10, 698-705.
- Friston, K.J., Frith, C.D., Fletcher, P., Liddle, P.F., & Frackowiak, R.S. (1996). Functional topography: multidimensional scaling and functional connectivity in the brain. *Cerebral Cortex*, 6, 156-164.
- Fulbright, R.K., Jenner, A.R., Mencl, W.E., Pugh, K.R., Shaywitz, B.A., Shaywitz, S.E., Frost, S.J., Skudlarski, P., Constable, R.T., Lacadie, C.M., Marchione, K.E., & Gore, J.C. (1999). The cerebellum's role in reading: a functional MR imaging study. *American Journal of Neuroradiology*, 20, 1925-1930.
- Gabrieli, J.D., Poldrack, R.A., & Desmond, J.E. (1998). The role of left prefrontal cortex in language and memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 95, 906-913.
- Gabrieli, J.D.E., Desmond, J.E., Demb, J.B., Wagner, A.D., Stone, M.V., Vaidya, C.J., & Glover, G.H. (1996). Functional magnetic resonance imaging of semantic memory processes in the frontal lobes. *Psychological Science*, 7, 278-283.
- Gernsbacher, M.A., & Kaschak, M.P. (2003). Neuroimaging studies of language production and comprehension. *Annual Review of Psychology*, 54, 91-114.
- Hugdahl, K., Lundervold, A., Ersland, L., Smievoll, A.I., Sundberg, H., Barndon, R., & Roscher, B.E. (1999). Left frontal activation during a semantic categorization task: an fMRI-study. *International Journal of Neuroscience*, 99, 49-58.
- Leiner, H.C., Leiner, A.L., & Dow, R.S. (1995). The underestimated cerebellum. *Human Brain Mapping*, 2, 244-254.

- Marien, P., Engelborghs, S., Fabbro, F., & De Deyn, P.P. (2001). The lateralized linguistic cerebellum: a review and a new hypothesis. *Brain and Language*, 79, 580-600.
- McDermott, K.B., Petersen, S.E., Watson, J.M., & Ojemann, J.G. (2003). A procedure for identifying regions preferentially activated by attention to semantic and phonological relations using functional magnetic resonance imaging. *Neuropsychologia*, 41, 293-303.
- Noppeney, U., & Price, C.J. (2002). A PET study of stimulus- and task-induced semantic processing. *NeuroImage*, 15, 927-935.
- Ojemann, G., Ojemann, J., Lettich, E., & Berger, M. (1989). Cortical language localization in left, dominant hemisphere. An electrical stimulation mapping investigation in 117 patients. *Journal of Neurosurgery*, 71, 316-326.
- Ojemann, J.G., Buckner, R.L., Akbudak, E., Snyder, A.Z., Ollinger, J.M., McKinstry, R.C., Rosen, B.R., Petersen, S.E., Raichle, M.E., & Conturo, T.E. (1998). Functional MRI studies of word-stem completion: reliability across laboratories and comparison to blood flow imaging with PET. *Human Brain Mapping*, 6, 203-215.
- Oldfield, O.D. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh Inventory. *Neuropsychologia*, 9, 97-113.
- Petersen, S.E., & Fiez, J.A. (1993). The processing of single words studied with positron emission tomography. *Annual Review of Neuroscience*, 16, 509-530.
- Petersen, S.E., Fox, P.T., Posner, M.I., Mintun, M., & Raichle, M.E. (1989). Positron emission tomographic studies of the processing of single words. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 1, 153-170.
- 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.
- Phelps, E.A., Hyder, F., Blamire, A.M., & Shulman, R.G. (1997). fMRI of the prefrontal cortex during overt verbal fluency. *NeuroReport*, 8, 561-565.

- Pilgrim, L.K., Fadili, J., Fletcher, P., & Tyler, L.K. (2002). Overcoming confounds of stimulus blocking: an event-related fMRI design of semantic processing. *NeuroImage, 16*, 713-723.
- Pillai, J.J., Araque, J.M., Allison, J.D., Sethuraman, S., Loring, D.W., Thiruvaiyaru, D., Ison, C.B., Balan, A., & Lavin, T. (2003). Functional MRI study of semantic and phonological language processing in bilingual subjects: preliminary findings. *NeuroImage, 19*, 565-576.
- Poldrack, R.A., Temple, E., Protopapas, A., Nagarajan, S., Tallal, P., Merzenich, M., & Gabrieli, J.D.E. (2001). Relations between the neural bases of dynamic auditory processing and phonological processing: evidence from fMRI. *Journal of Cognitive Neuroscience, 13*, 687-697.
- Poldrack, R.A., Wagner, A.D., Prull, M.W., Desmond, J.E., Glover, G.H., & Gabrieli, J.D.E. (1999). Functional specialization for semantic and phonological processing in the left inferior prefrontal cortex. *NeuroImage, 10*, 15-35.
- Poldrack, R.A., Wagner, A.D., Prull, M.W., Desmond, J.E., Glover, G.H., & Gabrieli, J.D.E. (1999). Functional specialization for semantic and phonological processing in the left inferior prefrontal cortex. *NeuroImage, 10*, 15-35.
- Price, C.J., Moore, C.J., & Friston, K.J. (1997). Subtractions, conjunctions, and interactions in experimental design of activation studies. *Human Brain Mapping, 5*, 264-272.
- Price, C.J., Wise, R.J., Watson, J.D., Patterson, K., Howard, D., & Frackowiak, R.S. (1994). Brain activity during reading. The effects of exposure duration and task. *Brain, 117*, 1255-1269.
- Pugh, K.R., Mencl, W.E., Jenner, A.R., Katz, L., Frost, S.J., Lee, J.R., Shaywitz, S.E., & Shaywitz, B.A. (2001). Neurobiological studies of reading and reading disability. *Journal of Communication Disorders, 34*, 479-492.
- Pugh, K.R., Shaywitz, B.A., Shaywitz, S.E., Constable, R.T., Skudlarski, P., Fulbright, R.K., Bronen, R.A., Shankweiler, D.P., Katz, L., Fletcher, J.M., & Gore, J.C. (1996). Cerebral organization of component processes in reading. *Brain, 119*, 1221-1238.

- Pulvermüller, F. (1999). Words in the brain's language. *Behavioral Brain Sciences*, 22, 253-336.
- Schlosser, R., Hutchinson, M., Joseffer, S., Rusinek, H., Saarimaki, A., Stevenson, J., Dewey, S.L., & Brodie, J.D. (1998). Functional magnetic resonance imaging of human brain activity in a verbal fluency task. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 64, 492-498.
- Small, S.L., Noll, D.C., Perfetti, C.A., Hlustik, P., Wellington, R., & Schneider, W. (1996). Localizing the lexicon for reading aloud: replication of a PET study using fMRI. *NeuroReport*, 7, 961-965.
- Talairach, J., & Tournoux, P. (1988). *Co-planar stereotaxic atlas of the human brain*. New York (NY): Thieme.
- Thompson-Schill, S.L., Aguirre, G.K., D'Esposito, M., & Farah, M.J. (1999). A neural basis for category and modality specificity of semantic knowledge. *Neuropsychologia*, 37, 371-376.
- Walter, N., Beauregard, M., & Joanette, Y. (2003). Contributions hémisphériques au traitement phonologique et sémantique de mots isolés. *Revue de neuropsychologie*, 13, 323-345 (2003)
- Weiller, C., Isensee, C., Rijntjes, M., Huber, W., Müller, S., Bier, D., Dutschka, K., Woods, R.P., Noth, J., & Diener, H.C. (1995). Recovery from Wernicke's aphasia: a positron emission tomographic study. *Annals of Neurology*, 37, 723-732.
- Xu, B., Grafman, J., Gaillard, W.D., Ishii, K., Vega-Bermudez, F., Pietrini, P., Reeves-Tyer, P., DiCamillo, P., & Theodore, W. (2001). Conjoint and extended neural networks for the computation of speech codes: the neural basis of selective impairment in reading words and pseudowords. *Cerebral Cortex*, 11, 267-277.
- Zatorre, R.J., Meyer, E., Gjedde, A., & Evans, A.C. (1996). PET studies of phonetic processing of speech: review, replication, and reanalysis. *Cerebral Cortex*, 6, 21-30.

Étude 5

**MORE DIFFICULT DOES NOT NECESSARILY
MEAN MORE BRAIN: FMRI CORRELATES OF
DISTINCT LEVELS OF DIFFICULTY FOR
PHONOLOGICAL AND SEMANTIC PROCESSING OF
WORDS IN NORMAL SUBJECTS**

Nathalie WALTER, Mario BEAUREGARD, Pierre BOURGOUIN, Gilles
BEAUDOIN & Yves JOANETTE

BRAIN AND LANGUAGE, 65, 90-92 (1998)

Introduction	91
Method	91
Results	92
Conclusion	93
References	94

Introduction

The processing of the phonological as opposed to the semantic dimension of words activates distinct regions of the brain. For example, using positron-emission tomography (PET), it has been shown that the phonological processing of words induces essentially left-hemispheric activation whereas the semantic word processing produces more bilateral activation and includes right-hemisphere structures (e.g. Démonet *et al.*, 1994; Price *et al.*, 1997). The main purpose of the present study was to replicate these findings using functional magnetic resonance imaging (fMRI) while looking further at the neurological correlates of the level of difficulty of the activation tasks. Indeed, there are discussions with respect to the theoretical relevance of subtracting tasks which rely on distinct sets of cognitive processes - e.g. activation minus reference tasks - (Frackowiak *et al.*, 1997). Recourse to different levels of difficulty in a given cognitive task is among the considered alternatives (Démonet *et al.*, 1991). Thus, the present study sought to explore the possibility that an increase in the level of difficulty of the activation tasks would express itself as an increase in the activated brain regions.

Method

Six young normal right-handed French-speaking students participated in this study: five females and one male, averaging 25.5 years in age (range: 23 to 28 years). Two distinct activation tasks were used: one which required the phonological processing of words (rhyme judgment for the sound « o ») and the other one which involved their semantic processing (semantic category judgment for « ANIMAL »). For each of these two tasks, level of difficulty was varied, based on (a) orthographical / phonological transparency for the phonological task, i.e. the presence or absence of the letter "o" in the final syllable of the target [e.g. *berlingot* versus *marteau*], and (b) prototypicality of the target in the semantic-category task [e.g. *cheval* (horse) versus *hyène* (hyena)]. Subjects were also submitted to a letter-case judgment control task (to report lower case) using comparable words. Stimuli were presented visually to subjects in their central visual field, using a non-ferromagnetic apparatus. Subjects

were instructed to answer as rapidly and accurately as possible by pressing one of two buttons (yes/no). Scanning was performed on a 1.5 Tesla system, with a castle type paradigm. Response times (RTs) to the cognitive tasks were simultaneously recorded. Functional images were acquired in the axial plane using an echo-planar pulse system. The parameters were: TR = 0.8 ms, TE = 54 ms, Flip = 90°, Number of slices = 28 and Thickness = 5 mm. Imaging data analysis was carried out using SPM96. Student t-test was used for behavioral data analysis.

Results

Results showed a unilateral left activation in the inferior (Brodmann area - BA 44, BA 9) and superior (BA 8) frontal gyri for the phonological condition [$p < 0.001$]. With respect to the semantic condition, activity was bilateral and included activations of the left inferior frontal (BA 44) and fusiform (BA 37) gyri as well as that of the right inferior (BA 44) and medial (BA 10) frontal gyri [$p < 0.001$]. However, there was no significant difference in terms of brain activation between the two levels of difficulty in both phonological and semantic conditions, whether the subtraction was made for 'low-high level' or for 'high-low level' of difficulty of the tasks (table 1).

Table 1. Cerebral activation for phonologic processing and for semantic processing of single word.

Activation loci	Comparison	
	Phonologic - Control Z Value (coordinates x, y, z)*	Semantic - Control Z Value (coordinates x, y, z)*
Inferior frontal gyri BA 44	4.23 (-48; 14; 26)	4.83 (-48; 14; 26) 4.62 (48; 44; -4)
BA 9	3.83 (-58; 14; 30)	
Superior frontal gyri (BA 8)	4.37 (-8; 32; 52)	
Fusiform gyri (BA 37)		4.40 (-46; -58; -18)
Medial frontal gyri (BA 10)		3.98 (28; -8; 20)

* Negative values correspond to voxels to the left (x) or below (z) the intercommissural line, or behind the intersection of the intercommissural and vertical anterior commissural lines (z).

Behavioral data showed (1) a significant difference between RTs for high-prototypical *versus* low-prototypical targets in the semantic condition [$p = 3.81 \times 10^{-3}$],

but (2) no difference between RTs for transparent *versus* non-transparent targets in the phonologic condition [$p=0.34$] (table 2).

Table 2. Average RTs for phonologic and semantic processing of words.

Difficulty levels	Comparison	
	Phonologic average	Semantic average
Low	TT ^a : 574.12 ms	HPT ^a : 675.30 ms
High	NTT ^a : 567.80 ms $p = 0.34$	LPT ^a : 570.61 ms $p < 0.05$

^a TT: transparent target; NTT: non-transparent target;
HPT: high-prototypical target; LPT: low-prototypical target

Conclusion

The present fMRI study replicates previously obtained results with PET, regarding the laterality of the cerebral activations for phonological and semantic processing of words. Indeed, the phonological processing of words activates left hemisphere regions only, while the semantic processing of words activates both left and right hemisphere regions. This result is coherent with the view that the right-hemisphere contribution to the processing of words is more important for their semantic dimension (Joanette *et al.*, 1990). However, distinct levels of processing difficulty of words - whether phonological or semantic - do not seem to imply differential brain activation. This absence of distinct levels of brain activation co-occurs with the demonstrated different levels of task difficulty, at least for the semantic activation condition. Thus, taken together, these results suggest that the level of difficulty of a given task does not express itself necessarily in the amount or locus of brain activation subserving it.

References

- Démonet, J.F., Nespoulous, J.L., & Celsis, P. (1991). L'activation cérébrale au cours de tâches linguistiques: réflexions méthodologiques. *Revue de Neuropsychologie, 1*, 281-293.
- Démonet, J.F., Price, C., Wise, R., & Frackowiak, R.S.J. (1994). Differential activation of right and left posterior sylvian regions by semantic and phonological tasks - A positron-emission tomography study in normal human subjects. *Neuroscience Letters, 21*, 25-28.
- Frackowiak, R.S.J., Friston, K.J., Frith, C.D., Dolan, R.J., & Mazziotta, J.C. (1997). *Human brain function*. San Diego, CA: Academic Press.
- Joannette, Y., Goulet, P., & Hannequin, D. (1990). *Right hemisphere and verbal communication*. New York: Springer-Verlag.
- Price, C.J., Moore, C.J., Humphreys, G.W., & Wise, R.J.S. (1997). Segregating semantic from phonological processes during reading. *Journal of Cognitive Neuroscience, 9*, 727-733.

Chapitre 5

DISCUSSION GÉNÉRALE

1. Aperçu des observations recueillies	96
2. Dimensions méthodologiques	98
3. Mise en perspective des faits observés	101
4. Impacts des résultats	109
5. Pistes et études futures	110

L'objectif de ce travail était de porter un nouveau regard sur le rôle des hémisphères cérébraux gauche et droit dans le traitement phonologique et sémantique des mots isolés. Une meilleure compréhension de la contribution propre de chaque hémisphère au traitement de la forme et/ou du sens des mots devait mettre un peu de lumière sur la coopération interhémisphérique qui s'établit lors de certains comportements langagiers. Ainsi, pour mettre en évidence les éventuelles différences dans l'implication de l'hémisphère gauche et de l'hémisphère droit dans le traitement des mots, deux tâches langagières distinctes (appariement graphophonémique et jugement d'appartenance catégorielle) ont été utilisées auprès de jeunes sujets sains, sur des stimuli dont le niveau de complexité était systématiquement varié. Par ailleurs, l'exploration du substrat neurobiologique qui sous-tend aussi bien le traitement phonologique que sémantique des mots a été réalisée via l'utilisation de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf).

1. Aperçu des observations recueillies

Les principaux résultats qui se dégagent des études rapportées ici indiquent que le traitement phonologique et le traitement sémantique des mots font intervenir chacun des deux hémisphères cérébraux de manière distincte. Ainsi, une première étude *Grapheme-phoneme processing of single words* [2001, *Brain and Cognition*, 46, 295-299] a surtout servi à déterminer les paramètres de la tâche phonologique qui serait utilisée ultérieurement. Les résultats ont montré qu'il n'y avait aucune différence significative dans le traitement des mots lorsque la tâche demandée est un jugement de rime, i.e. lorsque le son-cible est situé à la fin du mot. Par contre, dans la tâche d'appariement graphophonémique conservée dans les études subséquentes, pour laquelle le son-cible est situé à l'intérieur du mot, à l'exclusion de la syllabe finale, l'effet de la transparence des stimuli était indéniable puisque les mots transparents (e.g., rosaire et balise) sont traités plus rapidement que les mots non transparents (e.g., nausée et tourbe). La seconde étude *Semantic single word processing in French: a study in divided visual hemifields* [2002, *Brain and Language*, 83, 179-182], quant à elle, a bien indiqué, dans le cadre d'un traitement sémantique soit une tâche de jugement d'appartenance catégorielle réalisée en présentation visuelle

latéralisée des stimuli, que le profil de réponse reste similaire quel que soit le site de présentation des stimuli et qu'il y avait un effet de la prototypicalité des stimuli sur le temps de réponse des participants. En effet, il est apparu que les cibles (stimuli appartenant à la catégorie-cible des animaux) les plus prototypiques (e.g., dauphin) sont traités plus rapidement que les cibles peu prototypiques (e.g., hareng) et ce, qu'elles soient présentées dans l'hémichamp visuel droit ou gauche. Ayant déterminé que l'appariement graphophonémique et le jugement d'appartenance catégorielle pouvaient entraîner des effets robustes, ces deux tâches ont été utilisées dans une troisième étude, *Contributions hémisphériques au traitement phonologique et sémantique de mots isolés* [2003, *Revue de neuropsychologie*, 13, 323-345]. Les résultats de cette étude, réalisée en champ visuel divisé, ont souligné que les habiletés de chacun des deux hémisphères cérébraux étaient bien distinctes pour le traitement des mots isolés. De fait, le traitement phonologique des stimuli était essentiellement pris en charge par l'hémisphère gauche alors que leur traitement sémantique faisait appel aussi bien à l'hémisphère droit qu'à l'hémisphère gauche.

Suite à ces trois études s'appuyant sur les réponses comportementales des participants, la question s'est posée quant au substrat neurobiologique sous-jacent de ces deux types de traitement des mots isolés. Les tâches utilisées dans les études rapportées ici sont construites de manière à distinguer deux niveaux de complexité des stimuli. Ainsi, pour le traitement phonologique, l'appariement graphophonémique devait s'exercer sur des mots dont la transparence était soit de bas niveau (e.g., nausée et tourbe), soit de haut niveau (e.g., rosaire et balise). Pour le traitement sémantique, le jugement d'appartenance catégorielle faisait intervenir la prototypicalité des stimuli, soit de bas niveau (e.g., hareng et lavette), soit de haut niveau (e.g., dauphin et alcool). Une quatrième étude, *Phonological and semantic processing on single word: an fMRI study* [soumise], ont confirmé l'effet de transparence et de prototypicalité des stimuli sur les réponses comportementales (temps de réponse) des participants et ont montré que le profil d'activation cérébrale obtenu par un traitement phonologique ou sémantique des mots isolés différait aussi bien par la latéralisation que par l'étendue du réseau neuronal impliqué. Ainsi, pour le traitement de la forme des mots, l'appariement graphophonémique a fait apparaître un réseau d'activation

spécifique et circonscrit à l'hémisphère gauche, faisant notamment intervenir le gyrus frontal inférieur et le gyrus temporal moyen. Au contraire, le traitement du sens des mots, avec le jugement d'appartenance catégorielle, a montré un réseau d'activation plus distribué et plus diffus, avec l'implication des gyri frontaux inférieurs gauche et droit, du gyrus frontal moyen gauche et du gyrus fusiforme gauche. Les résultats d'une cinquième et dernière étude, *More difficult does not necessarily mean more brain: fMRI correlates of distinct levels of difficulty for phonological and semantic processing of words in normal subjects* [1998, *Brain and Language*, 65, 90-92], a permis d'explorer la possibilité d'un réseau neuronal différent, en termes d'étendue, de localisation et/ou d'intensité, selon le niveau de complexité des stimuli. Or, en dépit de différences significatives sur le plan des réponses comportementales, il est apparu qu'il était impossible de distinguer des profils d'activation qui soient le reflet des différents niveaux de complexité des stimuli.

En résumé, les jugements d'appariement graphophonémique et d'appartenance catégorielle sont deux tâches qui ont permis d'explorer simultanément deux aspects du traitement des mots, chez les mêmes participants. Les résultats obtenus ont montré que les réponses comportementales aussi bien que les profils d'activation cérébrale sont différents selon que le traitement porte sur la forme (phonologie) ou le sens (sémantique) des mots isolés. La contribution de chacun des deux hémisphères cérébraux s'est exprimée de manière différente pour l'un ou l'autre type de traitement des mots, à savoir que l'hémisphère gauche est impliqué aussi bien dans le traitement phonologique que sémantique des mots, alors que la participation de l'hémisphère droit n'est intervenue que dans le cadre du traitement sémantique des mots présentés.

2. Dimensions méthodologiques

L'utilisation de techniques d'exploration de l'activité cérébrale, que ce soit la présentation latéralisée de stimuli ou la neuroimagerie fonctionnelle, apporte sans conteste des informations de qualité pour la compréhension de la contribution hémisphérique à certains processus langagiers tels que le traitement phonologique et sémantique des mots isolés. Cependant, en dépit de leur intérêt, ces techniques souffrent d'un certain nombre de limites sur lesquelles il convient de se questionner.

En effet, et bien qu'elles soient indispensables à l'étude de l'asymétrie fonctionnelle des hémisphères, aucune de ces techniques, prise isolément, n'offre pourtant de réponse pleinement satisfaisante. C'est la conjonction des résultats obtenus par le biais de ces différentes techniques qui autorise la recherche de convergences et l'identification des caractéristiques propres à chacun des hémisphères dans une perspective de coopération fonctionnelle (Faure et Joanette, sous presse).

Ainsi, dans la présentation en champ visuel divisé (Beaumont, 1982), la présentation latéralisée des stimuli est une approche qui permet de documenter le potentiel d'un hémisphère isolé. Il convient d'être prudent avec l'idée que les contraintes méthodologiques imposées par cette technique suffisent à isoler parfaitement un hémisphère de son homologue. Par exemple, l'excentricité de la projection des stimuli par rapport à la vision fovéale est un paramètre qui peut modifier l'apparente supériorité d'un hémisphère dans une tâche donnée (Sergent, 1982). Ceci suggère que les résultats obtenus sont spécifiques aux conditions particulières dans lesquels ils l'ont été et ne sont donc pas nécessairement généralisables à d'autres conditions. Un autre point technique concerne la durée de projection des stimuli à l'écran, qui doit être inférieure à 200 ms (Aharonovich, 1997) pour éviter autant que possible le transfert inter-hémisphérique des informations. En effet, une durée de présentation plus longue des stimuli permettrait des saccades oculaires plus ou moins volontaires de la part du participant et, par voie de conséquence, une prise d'information par l'hémisphère cérébral auquel les stimuli n'étaient pas initialement destinés. La question se pose quant au compromis souvent incontournable que doit faire l'expérimentateur entre une telle présentation et le maintien d'un niveau acceptable de rendement de la part des sujets qui participent à l'expérience. Malgré tout, il reste que la technique de présentation en champ visuel divisé est utilisée facilement, sans équipement de contrôle objectif des mouvements oculaires, auprès de groupes de sujets relativement importants. Les résultats, interprétés en tenant compte de biais méthodologiques (durée de présentation, participants scolarisés, etc.), mettent cependant en lumière la spécialisation fonctionnelle de chaque hémisphère.

La neuroimagerie fonctionnelle, et notamment l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), représente une réelle opportunité de pénétrer encore plus

profondément la compréhension de la relation entre la structure cérébrale et les fonctions cognitives qu'elle sous-tend. Parmi les avantages indéniables de l'IRMf se trouvent sans conteste l'inocuité de son application sur des sujets humains ainsi que la résolution spatiale des images fournies (Le Bihan, 1997). En effet, en dépit d'un inconfort parfois rapporté par les participants, relativement à la position imposée par l'appareil ou encore au bruit produit lors de la phase d'acquisition des images, l'IRMf est une technique totalement non invasive car elle ne nécessite ni utilisation de rayons comme dans le cas d'une radiographie conventionnelle, ni injection de produit particulier comme pour la tomographie par émission de positons. Les images obtenues sont d'une qualité encore non égalée sur le plan spatial, ce qui signifie, en d'autres termes, que la résolution spatiale de l'ordre du millimètre permet de distinguer assez aisément des structures voisines et distinctes. L'essor vertigineux qu'ont connu ces techniques de pointe au cours de la dernière décennie ne doit cependant pas occulter les limites associées à ces nouvelles procédures. L'une d'entre elles concerne toujours la parcellisation des régions cérébrales qui sont identifiées comme étant impliquées dans un processus donné. Ainsi, alors que Broca associait l'expression du langage au pied de la troisième circonvolution frontale gauche (Broca, 1861), différentes études s'emploient dorénavant à décrire le rôle de certaines parties précises de cette région, telles ses portions postérieures et supérieures (e.g., Heim *et al.*, 2003). L'association de régions cérébrales d'activation précises à des types de traitement langagier non moins spécifiques, comme ici la portion supéropostérieure du gyrus frontal inférieur gauche avec certaines tâches de décision phonologique métalinguistique telles que la discrimination et le séquençage phonémiques, peut conduire à des interprétations de plus en plus difficiles à comprendre dans une perspective plus globale d'étude des composantes du langage. En poussant à l'extrême cette façon de procéder, l'utilisation de la neuroimagerie fonctionnelle peut contribuer à l'émergence d'une forme de "néophrénologie" où l'identification de régions parcellaires d'activation cérébrale ressemblerait étrangement à la théorie des bosses de Gall et Spurzheim (1810). Pour compléter et améliorer encore davantage les apports de la neuroimagerie spatiale dans le domaine des sciences de la cognition, il convient peut-être d'associer l'analyse des images fonctionnelles à d'autres sources

d'information, que ce soit sur le plan comportemental avec des études de chronométrie ou sur le plan temporel avec des données issues de techniques comme les potentiels évoqués (Segalowitz et Chevalier, 1998). Enfin, les progrès constants de ces technologies vont sûrement permettre de nouveaux développements: l'utilisation d'appareils plus sensibles (ayant recours à des champs magnétiques d'intensité plus importante permettant un meilleur ratio signal/bruit) ainsi que l'apparition des analyses de connectivité fonctionnelle (i.e. associer un poids et une direction aux relations qui existent entre les aires cérébrales activées) devraient conduire à mieux saisir la relation entre structure cérébrale et fonction cognitive, et, par voie de conséquence, à une meilleure compréhension du substrat neurobiologique des comportements de communication.

3. Mise en perspective des faits observés

Dans la première étude, *Grapheme-phoneme processing of single words* [2001, *Brain and Cognition*, 46, 295-299], deux types de tâches ont été utilisées pour l'exploration du traitement phonologique des mots. De nombreux travaux ont adopté la tâche de jugement de rime dans le cadre de l'étude du traitement phonologique des mots (e.g., McDermott *et al.*, 2003; Poldrack *et al.*, 2001). Bien souvent, la tâche de jugement de rime correspond à la comparaison de deux mots qui présentent ou non un phonème identique. Dans le cas des études rapportées dans ces pages, un choix méthodologique s'est rapidement imposé, à savoir l'utilisation de mots strictement isolés et non des paires de mots. Puisque la langue française autorise l'écriture d'un phonème sous la forme de plusieurs graphèmes distincts (e.g., le phonème /o/ sous la forme des graphèmes "o", "au" et "eau"), c'est-à-dire qu'elle permet la manipulation de la complexité des stimuli sous la forme de leur transparence graphophonémique, le type de traitement phonologique étudié s'est limité à la comparaison entre un mot et un son-cible. Il est apparu clairement que les deux types de traitement phonologique utilisés, à savoir un jugement de rime et un appariement graphophonémique, conduisaient à des réponses comportementales différentes en termes de temps de réponse. De fait, la transparence des stimuli exerce une influence sur les performances des participantes dans le cas de l'appariement graphophonémique alors

que ce facteur est sans effet sur les temps de réponse enregistrés lors de la tâche de jugement de rime. Plusieurs explications peuvent être apportées à ce sujet. D'abord, il est possible que les participants de cette étude présentent un profil de lecture qui annihile l'effet de la transparence des stimuli dans une tâche de rime (Bub and Lewine, 1988). En effet, les jeunes femmes qui ont pris part à l'étude sont toutes des étudiantes de premier cycle universitaire. Elles peuvent donc être considérées comme des lectrices habiles, voire même sur-entraînées. Il serait intéressant de réaliser la même comparaison entre jugement de rime et appariement graphophonémique en demandant cette fois à des individus moins scolarisés d'effectuer les deux tâches. Peut-être qu'une différence significative entre stimuli transparents et non transparents pourrait alors apparaître dans la tâche de rime. Comme seconde explication possible, il faut souligner que la position même du graphème correspondant au phonème-cible semble représenter un facteur déterminant dans le traitement des mots isolés sur le plan de leur forme. Lors du jugement de rime, les sujets pouvaient choisir de focaliser toute leur attention sur la dernière syllabe du mot et donc faire en quelque sorte abstraction du reste du mot (Seidenberg, 1987). La question se pose quant à l'influence d'une telle "stratégie" sur une éventuelle différence, aussi minime soit-elle, de traitement des mots selon leur transparence. L'obligation d'explorer le mot dans son entier avant de répondre, lors de l'appariement graphophonémique, aurait permis de souligner que les stimuli transparents sont traités plus rapidement que les stimuli non transparents.

Dans le cadre de la seconde étude, *Semantic single word processing in French: a study in divided visual hemifields* [2002, *Brain and Language*, 83, 179-182], deux points peuvent être retenus. En premier lieu, la similarité du profil de réponse (toujours en termes de temps de réponse) obtenu dans chacun des deux hémichamps visuels appuie l'hypothèse d'une contribution hémisphérique bilatérale au traitement sémantique des mots isolés, soit ici un jugement d'appartenance catégorielle. Les habiletés lexico-sémantiques de l'hémisphère droit sont abondamment décrites dans la littérature depuis la deuxième moitié du XX^e siècle (pour une revue, voir Joannette *et al.*, 1990). Les résultats rapportés ici vont dans le même sens que la littérature et suggèrent que l'hémisphère droit dispose de certaines habiletés à traiter des relations

sémantiques telles que celles qui s'établissent lorsqu'un mot doit être associé ou non à une catégorie sémantique précise (e.g., les animaux). En second lieu, il semble bien que la prototypicalité des stimuli, c'est-à-dire la place qu'ils occupent dans la catégorie sémantique considérée, soit un facteur déterminant quant à la contribution de l'un et l'autre hémisphère au traitement sémantique des mots. En effet, comme pour la contrétude (Day, 1977) ou l'imageabilité (Day, 1979), le potentiel langagier de l'hémisphère droit s'exprimerait dans le traitement des mots dont le niveau de prototypicalité est élevé alors que l'hémisphère gauche traiterait aussi bien les mots peu prototypiques que très prototypiques (Koivisto et Laine, 1999). Un bémol doit toutefois être apporté à cette assertion car il est toujours possible de considérer que la fréquence lexicale (fréquence d'utilisation dans la langue) est un facteur confondant pour toute étude qui manipule la prototypicalité. Parmi les auteurs qui se sont intéressés à la latéralisation du traitement des mots selon leurs caractéristiques lexicales, Hines montrait déjà en 1976 que la contribution de l'hémisphère droit était plus effective lorsque les mots présentaient une fréquence lexicale élevée. Or, il est clair que la construction de la liste de mots utilisés pour la tâche de jugement d'appartenance catégorielle fait en sorte que les stimuli jugés¹ peu prototypiques présentent une fréquence lexicale nettement inférieure à celle des stimuli très prototypiques, surtout en raison des extrêmes dans les deux groupes (voir annexes 3a à 3d). Par ailleurs, considérant des stimuli de fréquence lexicale (FrLex) équivalente mais de prototypicalité (Prot) distincte (Content *et al.*, 1990), il apparaît que l'hyponymie² des stimuli doit être considérée comme un facteur influençant leur traitement. Ainsi, avec "scarabée" [FrLex: 174; Prot: 2.70] et "cigale" [FrLex: 374; Prot: 3.10] par opposition à "chevreuil" [FrLex: 174; Prot: 6.00] et "dauphin" [FrLex: 370; Prot: 6.00], les mammifères, même marins, sont nettement plus prototypiques de la catégorie des animaux que le sont les insectes. De fait, la prototypicalité des mots comme "chevreuil" et "dauphin" se trouve renforcée par rapport à celle de "scarabée" et "cigale", sans qu'il soit tenu compte de la fréquence lexicale de chacun de ces mots.

¹ De jeunes adultes ont évalué une liste de noms d'animaux selon une échelle de cotation comprenant sept niveaux. Les stimuli peu prototypiques ont été choisis parmi ceux dont la cote était comprise entre 1 et 3.5 alors que les stimuli très prototypiques affichaient une cote comprise entre 4.5 et 7.

² L'hyponyme est le terme générique, opposé à l'*hyponyme*. Par exemple, "insecte" est l'hyponyme de "papillon", "mouche", "pou", etc. (définition du Petit Robert, 1990).

De plus, neuf stimuli très prototypiques ne sont pas des mammifères et certains d'entre eux sont extrêmement fréquents (comme "aigle" ou "canard"), de même que cinq stimuli peu prototypiques sont des mammifères et certains fort peu fréquents (comme "chamois" et "mammoth"). Ainsi, il apparaît que la fréquence et la prototypicalité peuvent représenter des facteurs qui se différencient l'un de l'autre, du moins pour certains stimuli puisque quelques items sont fréquents en dépit d'un hyperonyme moins prototypique ("oiseau") ou peu fréquents avec un hyperonyme plus prototypique ("mammifère").

Les effets de la transparence des stimuli dans la tâche d'appariement graphophonémique, pour l'exploration du traitement phonologique des mots, ainsi que ceux de la prototypicalité des stimuli dans la tâche de jugement d'appartenance catégorielle pour l'étude du traitement sémantique des mots, ont donc été établis de manière relativement solide dans les deux premières études rapportées dans ces pages. Cette notion de niveaux de complexité des stimuli a été bien soulignée dans les études qui s'appuyaient sur les réponses comportementales (les temps de réponse spécifiquement): les mots les plus transparents (e.g., rosaire et balise) et les plus prototypiques (e.g., dauphin) sont traités plus rapidement que les mots les moins transparents (e.g., nausée et tourbe) et les moins prototypiques (e.g., hareng). L'exploration de l'influence des niveaux de complexité sur la cartographie d'activation cérébrale a été rapportée dans l'étude 5, *More difficult does not necessarily mean more brain: fMRI correlates of distinct levels of difficulty for phonological and semantic processing of words in normal subjects* [1998, *Brain and Language*, 65, 90-92]. L'utilisation de différents niveaux de complexité dans une même tâche a été une des alternatives méthodologiques proposées par Démonet et ses collaborateurs (1991) pour pallier les difficultés liées au paradigme de soustraction (Frackowiak *et al.*, 1997) couramment utilisé en neuroimagerie fonctionnelle. Or, dans le cas des tâches d'appariement graphophonémique et de jugement d'appartenance catégorielle utilisées, il est apparu que la comparaison des états d'activation correspondants aux deux niveaux de complexité dans une même tâche, qu'elle soit de nature phonologique ou sémantique, conduisait à une absence flagrante d'activation cérébrale statistiquement proéminente. Ce résultat quelque peu décevant de prime

abord, pourtant associé à un traitement des stimuli plus ou moins rapide selon leur niveau de complexité, peut être interprété sous plusieurs angles. En premier lieu, des aspects purement statistiques peuvent être incriminés pour justifier un tel résultat. L'exploration de l'activation cérébrale correspondant au traitement de la complexité des stimuli a été faite ici auprès d'un groupe de sujets qui, s'ils partagent des caractéristiques semblables en termes d'âge, de scolarité et de latéralité manuelle, sont néanmoins différents les uns des autres en matière de cartographie fonctionnelle pour chacune des tâches utilisées. En effet, les résultats présentés dans l'étude 4 reflètent ce qui est commun à la majorité des participants pour une tâche donnée. Or l'hétérogénéité souvent observée dans les activations cérébrales individuelles, aussi bien en ce qui concerne leur étendue que leur intensité, peut faire en sorte que de subtiles différences d'activation ne soient plus perceptibles dans le groupe. Dans la même veine, il ne faut pas exclure que les décisions méthodologiques elles-mêmes, à savoir le devis expérimental, les conditions d'expérimentation et le choix des participants, puissent avoir nui à l'identification de profils d'activation distincts selon le niveau de complexité des stimuli. Ainsi, la question se pose quant à l'impact de l'alternance des consignes, rendue obligatoire par l'utilisation d'un protocole en blocs et la nécessité de présenter aux participants une tâche d'activation et une tâche de référence. Par ailleurs, si les résultats font état d'une distribution spatiale des activations cérébrales qui ne semble pas différente selon le niveau de complexité des stimuli, qu'en est-il du décours temporel associé? En d'autres mots, si les cartographies fonctionnelles sont le reflet d'une activation globale dans une région donnée, est-il possible de concevoir que la réponse hémodynamique suive une courbe temporelle différente selon que les stimuli présentés sont de bas niveau de complexité (stimuli transparents ou stimuli très prototypiques) et de haut niveau de complexité (stimuli non transparents ou stimuli peu prototypiques)? D'un autre côté, il est également possible de conclure que les sites d'activation engagés dans les réseaux cérébraux sous-tendant le traitement des mots selon leur niveau de complexité sont simplement superposables, ce qui explique qu'aucun site ne se démarque. Ainsi, la différence dans le temps de traitement des stimuli en fonction de leur niveau de complexité ne s'expliquerait ni par un ensemble de sites d'activation différent, ni par

des intensités d'activation distinctes. Il se pourrait, toutefois, que des différences auraient pu être mises en évidence par le biais d'une analyse du profil de connectivité fonctionnelle entre ces sites. L'accès à de telles analyses permettra, dans le futur, d'examiner cette possibilité.

L'exploration, chez les mêmes participants, du traitement de la forme et du sens des mots isolés, par le biais de tâches d'appariement graphophonémique et de jugement d'appartenance catégorielle, a bénéficié ici de l'apport de deux techniques: la présentation en champ visuel divisé et l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle. Les résultats sont rapportés respectivement dans la troisième étude, *Contributions hémisphériques au traitement phonologique et sémantique de mots isolés* [2003, *Revue de neuropsychologie*, 13, 323-345] et dans la quatrième étude, *Phonological and semantic processing on single word: an fMRI study* [soumise]. La présentation en champ visuel divisé est une des méthodes les plus courues dans la littérature pour étudier la contribution effective de chacun des deux hémisphères cérébraux au langage (Faure et Joannette, sous presse). L'utilisation de l'IRMf s'affirme de plus en plus comme incontournable pour préciser l'implication de régions cérébrales aux deux types de traitement des mots étudiés (Le Bihan, 1997). Que ce soit pour l'une ou l'autre des deux tâches utilisées dans les études rapportées ici, les résultats obtenus vont dans le sens de la littérature. En effet, en ce qui concerne le traitement sémantique choisi, à savoir le jugement d'appartenance catégorielle, il semble que les deux hémisphères cérébraux contribuent au jugement d'appartenance catégorielle proposé. L'implication de l'hémisphère droit dans les processus de traitement sémantique constitue une pierre angulaire dans la littérature concernant le rôle de chacun des hémisphères cérébraux dans le langage (Hannequin *et al.*, 1987). Cette contribution hémisphérique droite a été reconnue plus tardivement que celle de l'hémisphère gauche. En se concentrant sur les études lésionnelles, il apparaît que l'hémisphère droit peut subir des lésions plus étendues sans que des altérations évidentes soient observées au niveau des comportements de communication, au contraire de l'hémisphère gauche. Selon Semmes (1968), cette disparité reflète un mode d'organisation différent des processus cognitifs, processus qui, du côté droit, seraient distribués sur de plus grandes régions du tissu cérébral que dans la moitié

gauche du cerveau. Cette assertion semble être confirmée par les études de neuroimagerie fonctionnelle qui montrent que les régions cérébrales impliquées dans le traitement sémantique, notamment des mots, sont souvent plus diffuses et plus dispersées que celles qui sont impliquées dans le traitement des aspects phonologiques entre autres (Bookheimer, 2002). L'obtention de profils de réponse similaires dans les hémichamps visuels gauche et droit (voir étude 3) et la contribution des régions frontales gauches et droites (voir étude 4) indiquent bien l'intervention des deux hémisphères cérébraux dans une tâche de jugement d'appartenance catégorielle. Comme pour le traitement sémantique, dans le cas de l'appariement graphophonémique utilisé pour explorer le traitement phonologique des mots, les résultats rapportés dans ce travail sont congruents avec la littérature. De fait, les profils de réponse distincts établis dans les champs visuels gauche et droit suggèrent bien que l'hémisphère gauche prendrait en charge ce type de traitement de la forme des mots isolés écrits. De nombreuses études en neuroimagerie fonctionnelle ont souligné le rôle des régions hémisphériques gauches pour ce qui a trait aux aspects phonologiques du traitement des mots (pour une revue, voir Gernsbacher et Kaschak, 2003). En dépit de cette prééminence gauche, il apparaît cependant que l'hémisphère droit contribue également au traitement phonologique des mots, probablement d'une façon différente de celle de son homologue gauche. Puisque la tâche choisie est un appariement graphophonémique, c'est-à-dire l'association de graphèmes correspondants ("au", "o") ou non ("oi", "ou", "on") à un phonème-cible unique (/o/), il est possible que les modes de traitement de l'information, différents pour l'hémisphère droit et l'hémisphère gauche, expliquent en partie la contribution relative de chaque hémisphère à la réalisation de cette tâche. De fait, une hypothèse veut que l'hémisphère gauche soit spécialisé pour le traitement analytique des informations de quelque sorte que ce soit, alors que son homologue droit serait davantage dévolu au traitement holistique (Trope *et al.*, 1992). Ainsi, dans la tâche d'appariement graphophonémique, l'hémisphère droit aurait tendance à traiter les stimuli sans distinction selon leur transparence graphophonémique alors que ce facteur semble influencer le traitement des mêmes stimuli par la moitié gauche du cerveau. Les résultats obtenus en IRMf (voir étude 4) montrent quant à eux que si

l'activation cérébrale est essentiellement située au niveau de l'hémisphère gauche, certaines régions droites se distinguent également. La possible participation de l'hémisphère droit au traitement phonologique des mots n'est pas inconnue dans la littérature. Récemment, différentes études (e.g., Ruff *et al.*, 2003; Grossman *et al.*, 2002; Poldrack *et al.*, 2001) ont souligné qu'un traitement phonologique pouvait aussi conduire à une activation de certaines régions cérébrales droites. La question se pose cependant quant à la nature réelle du traitement effectué par l'hémisphère droit sur le plan de la forme des stimuli. En effet, la contribution de cet hémisphère au traitement phonologique des mots pourrait aussi bien être spécifique que non spécifique. D'une part, différentes hypothèses peuvent être avancées, en rapport avec l'activation cérébrale droite qui a été observée. Par exemple, comme l'ont suggéré Pugh *et al.* (1997), la participation de l'hémisphère droit au traitement phonologique serait le reflet des règles de conversion graphophonémique qui sont mises en œuvre dans une tâche comme l'appariement graphophonémique. Les habiletés de l'hémisphère droit à contribuer au traitement lexical des mots (Joanette *et al.*, 1990) pourraient également être imputées aux résultats obtenus dans ce type de traitement phonologique. D'autre part, l'activation observée au niveau des régions cérébrales droites pourrait représenter l'apport non spécifique de l'hémisphère droit en termes de ressources cognitives (Monetta et Joanette, 2003), notamment parce que les participantes avaient à composer avec une alternance de consignes dans l'étude en IRMf lors de laquelle elles devaient réaliser aussi bien la tâche d'appariement graphophonémique qu'une tâche de référence (jugement de casse).

En résumé, les résultats obtenus au cours des études constituant le corps de ce travail montrent bien que si les deux hémisphères cérébraux disposent d'habiletés langagières qui leur sont propres, il n'est pas exclu que chacun d'eux participe au traitement des mots isolés, que ce soit sur le plan de leur forme ou/et de leur sens. Il est sans conteste possible d'envisager alors que l'hémisphère droit et l'hémisphère gauche coopèrent dans le but de rendre le traitement des mots le plus efficient possible (Sergent, 1982).

4. Impacts des résultats

Les différentes études rapportées dans ces pages montrent bien que l'exploration du rôle respectif des hémisphères gauche et droit au traitement phonologique et sémantique des mots représente l'une des pierres angulaires dans la compréhension de la contribution propre de chaque hémisphère au langage. Il apparaît en effet que si le rôle de l'hémisphère gauche est confirmé quant au traitement de la forme aussi bien que du sens des mots, l'implication de l'hémisphère droit se précise davantage. De fait, l'hémisphère gauche dispose de tous les atouts pour traiter les mots aussi bien sur le plan de leur forme que de leur sens, et quel que soit leur niveau de complexité. En d'autres termes, il semble que l'hémisphère gauche intervienne aussi bien pour traiter les mots au niveau phonologique selon qu'ils soient transparents ou non, ainsi qu'au niveau sémantique selon qu'ils soient prototypiques ou non. Par ailleurs, différentes études antérieures à celles qui sont présentées ici ont mis en lumière les habiletés de l'hémisphère droit au traitement des aspects sémantiques du langage et ce, aussi bien pour les mots isolés que pour le discours, chez les individus normaux et/ou pathologiques (Joanette *et al.*, 1990). Les travaux menés en champ visuel divisé (étude 3) suggèrent que si l'hémisphère gauche prend en charge aussi bien le traitement phonologique que sémantique des mots isolés, l'hémisphère droit présente lui aussi certaines habiletés à traiter les stimuli sur le plan de leur sens mais aussi de leur forme. Cette implication de l'hémisphère droit dans le traitement phonologique des mots peut sembler aller à l'encontre de ce qui est connu et accepté de la contribution de chaque hémisphère au langage. Cependant, sans remettre vraiment en question l'enseignement classique relatif à la prise en charge du langage chez les sujets droitiers, il apparaît que l'hémisphère droit n'est peut-être pas aussi dépourvu d'habiletés spécifiques pour le traitement phonologique des mots. Bien sûr, la question de la nature de cette contribution hémisphérique droite au langage, et notamment au traitement des mots, pourrait se poser aussi bien en termes de contribution spécifique et/ou de ressources cognitives. En d'autres termes, même s'il semble sans conteste que l'hémisphère droit soit impliqué dans un certain nombre de composantes du langage, peut-être est-ce seulement qu'il participe en secondant, de par ses ressources, l'hémisphère gauche qui reste alors le grand responsable du

traitement des mots (Monetta et Joannette, 2003). Même si cette hypothèse est séduisante, il est difficile de croire que l'hémisphère droit ne soit mis à partie dans les tâches langagières que lorsque la disponibilité exigée en ressources cognitives excède ce que peut fournir l'hémisphère gauche seul.

Sur le plan clinique, une meilleure compréhension du rôle respectif de chaque hémisphère cérébral dans les comportements langagiers devrait nécessairement conduire à une prise en charge plus adéquate des patients présentant des troubles de communication. Ainsi, si le rôle de l'hémisphère droit est mieux défini par rapport à celui de son homologue gauche, il est possible de penser que les thérapies pourraient s'orienter selon une meilleure utilisation du potentiel résiduel de la masse cérébrale intacte. Bien sûr, il convient d'inclure dans ce schéma la notion de décours temporel. Des travaux récents, aussi bien en champ visuel divisé (e.g., Ansaldo *et al.*, 2002) qu'en neuroimagerie fonctionnelle (e.g., Vitali *et al.*, 2003), ont montré que la participation de l'hémisphère droit au langage récupéré dans l'aphasie est très variable, selon l'individu examiné et/ou selon le décours temporel après l'accident vasculaire à l'hémisphère gauche. S'il advient cependant que les habiletés langagières des deux hémisphères soient mieux cernées dans les années à venir, il n'est pas improbable que les cliniciens développent des outils de diagnostic et de thérapie qui prennent en compte tous les schémas d'intervention de l'hémisphère gauche et de l'hémisphère droit dans les comportements de communication.

5. Pistes et études futures

Les études rapportées ici n'ont concerné que le traitement de la forme et du sens de mots isolés. Bien sûr, d'autres dimensions du langage restent à explorer pour circonscrire encore mieux le rôle propre à chacun des deux hémisphères cérébraux dans les comportements de communication. Ainsi, toujours dans le cadre de l'étude du traitement des mots isolés, d'autres travaux pourraient porter sur différentes caractéristiques de ces mots. Par exemple, l'exploration de la contribution relative de chaque hémisphère pourrait s'appuyer sur les différences de fréquence, de concrétude,

d'imageabilité, mais aussi sur l'orthographe, la morphologie³, le genre des mots. Par ailleurs, le langage ne se réduisant pas au traitement des mots isolés, d'autres composantes restent à explorer. L'étude du traitement des phrases devrait permettre d'accéder au niveau de la syntaxe⁴ ainsi que de la prosodie⁵ et, de ce fait, enrichir encore les connaissances relatives au rôle des hémisphères cérébraux. Le traitement sémantique lui-même pourrait être étudié sous l'angle de la relation entre deux mots, mais aussi dans des phrases puis dans le discours. Ce dernier peut d'ailleurs être considéré comme l'ultime étape d'exploration des comportements de communication, faisant intervenir toutes les composantes précédemment explorées au niveau des mots et des phrases, ainsi que tout ce qui a trait à la pragmatique, c'est-à-dire à l'utilisation du langage en contexte.

En plus de la manipulation des caractéristiques des stimuli et/ou des procédures, l'exploration de la contribution de chacun des deux hémisphères cérébraux, ainsi que de leur interaction, devrait tenir compte de la population à laquelle s'adresse l'étude. En effet, dans les cas des études rapportées ici, les participants sont de jeunes femmes francophones, droitières et de niveau universitaire. Or, il est bien connu que la latéralisation fonctionnelle pour le langage est différente selon l'âge et le genre entre autres. Ainsi, les participantes, de jeunes femmes droitières, retenues pour ces études présentent théoriquement un degré de latéralisation fonctionnelle à gauche pour le langage qui est moindre. Qu'en serait-il donc du rôle propre à l'hémisphère gauche et à l'hémisphère droit pour des hommes, pour des personnes plus âgées ou encore pour des individus non droitiers?

Une meilleure compréhension de la contribution respective de chacun des deux hémisphères au langage, aussi bien que de leur coopération, implique une diversification des sources d'information (études comportementales, observations cliniques, imagerie fonctionnelle spatiale et temporelle), des stimuli et procédures employées ainsi que des populations échantillonnées. En somme, ce travail a permis de souligner les points de convergence et de divergence dans la contribution de

³ Étude des mots, de leur formation et de leurs flexions.

⁴ Ensemble des règles qui régissent la formation correcte des énoncés.

⁵ Ensemble des éléments phoniques (intonation affective, particularismes régionaux, accent tonique, montée mélodique, etc.) qui caractérisent le langage parlé.

chaque hémisphère cérébral au traitement des mots, que ce soit sur le plan de leur forme ou de leur sens, davantage qu'une probable coopération interhémisphérique. Comme l'a déjà énoncé Justine Sergent, "la spécialisation fonctionnelle des hémisphères cérébraux est un phénomène biologique unique qui conserve une grande partie de ses mystères" (Sergent, 1994). Les connaissances relatives au rôle que jouent les hémisphères gauche et droit dans tous les aspects du langage gagneraient à être affinées dans un contexte favorisant la coopération interhémisphérique plus que la confrontation, dans le sens que l'identification du poids de chaque hémisphère dans l'une ou l'autre des sphères de la cognition, notamment du langage, renforcerait l'idée que les deux hémisphères sont nécessaires aux processus cognitifs.

RÉFÉRENCES

Elles rassemblent les références aux travaux cités dans l'introduction (chapitre 1) et la discussion (chapitre 5) de la thèse.

- Aharonovich, E. (1997). Hemispheric functioning: temporal dynamics in the visual fields. *Dissertation Abstracts International B: the Sciences & Engineering*, 58, 2170.
- Ansaldo, A.I., Arguin, M., & Lecours, A.R. (2002). Initial right hemisphere take-over and subsequent bilateral participation during recovery from aphasia. *Aphasiology*, 16, 287-304.
- Beaumont, J.G. (1982). Studies with verbal stimuli. In J.G. Beaumont (Ed.). *Divided visual field studies of cerebral organisation*. London: Academic Press.
- Belliveau, J.W., Kennedy, D.N., McKinstry, R.C., Buchbinder, B.R., Weisskoff, R.M., Cohen, M.S., Vevea, J.M., Brady, T.J., & Rosen, B.R. (1991). Functional mapping of the human visual cortex by magnetic resonance imaging. *Science*, 254, 716-719.
- Binder, J.R., Frost, J.A., Hammeke, T.A., Cox, R.W., Rao, S.M., & Prieto, T. (1997). Human brain language areas identified by functional magnetic resonance imaging. *Journal of Neuroscience*, 17, 353-362.
- Binder, J.R., Rao, S.M., Hammeke, T.A., Yetkin, F.Z., Jesmanowicz, A., Bandettini, P.A., Wong, E.C., Estkowski, L.D., Goldstein, M.D., Houghton, V.M., & Hyde, J.S. (1994). Functional magnetic resonance imaging of human auditory cortex. *Annals of Neurology*, 35, 662-672.
- Bloch, F., Hansen, W.W., & Packard, M. (1946). Nuclear induction. *Physical Review*, 69, 127.
- Bookheimer, S. (2002). Functional MRI of language: new approaches to understanding the cortical organization of semantic processing. *Annual Review of Neuroscience*, 25, 151-188.
- Bouillaud, J.B. (1825). Recherches cliniques propres à démontrer que la perte de la parole correspond à la lésion des lobules antérieurs du cerveau. *Archives générales de médecine*, 8, 25-45.
- Broca, P. (1861). Remarques sur le siège de la faculté du langage articulé, suivies d'une observation d'aphémie. *Bulletin de la Société Anatomique*, 36, 330-357.
- Broca, P. (1863). Localisations des fonctions cérébrales. Siège de la faculté du langage articulé. *Bulletin de la Société d'Anthropologie*, 4, 200-208.

- Bub, D.N., & Lewine, J. (1988). Different modes of word recognition in the left and right visual fields. *Brain and Language*, 33, 161-188.
- Cappa, S.F., Perani, D., Schnur, T., Tettamanti, M., & Fazio, F. (1998). The effects of semantic category and knowledge type on lexical-semantic access: a PET study. *NeuroImage*, 8, 350-359.
- Champagne, M., Nespoulous, J.L., & Joanette, Y. (2002). Do all right brain-damaged subjects show a deficit in non literal language comprehension? *Brain and Language*, 83, 214-217.
- Chiarello, C., Liu, S., & Shears, C. (2001). Does global context modulate cerebral asymmetries? A review and new evidence on word imageability effects. *Brain and Language*, 79, 360-378.
- Code, C. (1987). *Language, aphasia, and the right hemisphere*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Code, C., & Joanette, Y. (2003). The control of speech in the adult brain: the disconnected right hemispheres of PS, VP & JW. In C. Code, C.W. Wallesch, Y. Joanette, & A.R. Lecours (Eds.) *Classic cases in neuropsychology II*. New York (NY): Psychology Press.
- Content, A., Mousty, P., & Radeau, M. (1990). BRULEX: une base de données lexicales informatisée pour le français écrit et parlé. *L'Année Psychologique*, 90, 551-566.
- Critchley, M. (1962). Speech and speech-loss in relation to duality of the brain. In V.B. Mountcastle (Ed.). *Interhemispheric relations and cerebral dominance*. Baltimore: John Hopkins Press.
- Dax, M. (1865). Lésions de la moitié gauche de l'encéphale coïncidant avec l'oubli des signes de la pensée (Lu au Congrès méridional tenu à Montpellier en 1836). *Gazette Hebdomadaire de Médecine et de Chirurgie*, 2, 259-262.
- Day, J. (1977). Right hemisphere language processing in normal right-handers. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 3, 518-528.
- Day, J. (1979). Visual half-field recognition as a function of syntactic class and imageability. *Neuropsychologia*, 17, 515-519.

- Dehaene, S. (1997). La méthode de soustraction. In S. Dehaene (Ed.). *Le cerveau en action*. Paris: Presses universitaires de France.
- Deloche, G., Seron, X., Scius, G., & Segui, J. (1987). Right hemisphere language processing: lateral differences with imageable and nonimageable ambiguous words. *Brain and Language*, 30, 197-205.
- Demb, J.B., Desmond, J.E., Wagner, A.D., Vaidya, C.J., Glover, G.H., & Gabrieli, J.D. (1995). Semantic encoding and retrieval in the left inferior prefrontal cortex: a functional MRI study of task difficulty and process specificity. *Journal of Neuroscience*, 15, 5870-5878.
- Démonet, J.F. (1999). Imageries fonctionnelles cérébrales: vers une physiologie de la cognition humaine. *Médecine/Science*, 15, 457-466.
- Démonet, J.F., Chollet, F., Ramsay, S., Cardebat, D., Nespoulous, J.L., Wise, R., Rascol, A., & Frackowiak, R. (1992). The anatomy of phonological and semantic processing in normal subjects. *Brain*, 115, 1753-1768.
- Démonet, J.F., Nespoulous, J.L., & Celsis, P. (1991). L'activation cérébrale au cours de tâches linguistiques: réflexions méthodologiques. *Revue de Neuropsychologie*, 1, 281-293.
- Démonet, J.F., Price, C., Wise, R., & Frackowiak, R.S. (1994). A PET study of cognitive strategies in normal subjects during language tasks. Influence of phonetic ambiguity and sequence processing on phoneme monitoring. *Brain*, 117, 671-682.
- Devlin, J.T., Russell, R.P., Davis, M.H., Price, C.J., Wilson, J., Moss, H.E., Matthews, P.M., & Tyler, L.K. (2000). Susceptibility induced loss of signal: comparing PET and fMRI on a semantic task. *NeuroImage*, 11, 589-600.
- Eisenson, J. (1962). Language and intellectual modifications associated with right cerebral damage. *Language and Speech*, 5, 49-53.
- Faure, S. (2003). Analyse en champ visuel divisé. In D. Cardebat, F. Eustache & S. Faure (Eds.). *Méthodes en neuropsychologie: applications à l'étude de la mémoire et du langage*. Atelier de formation INSERM n°142.
- Faure, S., & Blanc-Garin, J. (1994). Difficultés d'évocation lexicale après lésion droite: recherche de profils. *Revue de neuropsychologie*, 4, 403-435.

- Faure, S., & Joannette, Y. (sous presse). Hémisphère droit, hémisphère gauche et cognition: latéralisation, latéralité et coopération inter-hémisphérique. In B. Lechevalier, F. Eustache & F. Viader (Eds.). *Traité de neuropsychologie*. Bruxelles: De Boek.
- Fiez, J.A. (1996). Cerebellar contributions to cognition. *Neuron*, 16, 13-15.
- Flourens, P. (1824). *Recherches expérimentales sur les propriétés et les fonctions du système nerveux, dans les animaux vertébrés*. Paris: Crevot.
- Fodor, J.A. (1983). *The modularity of mind*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Fox, P.T., & Raichle, M.E. (1986). Focal physiological uncoupling of cerebral blood flow and oxidative metabolism during somatosensory stimulation in human subjects. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 83, 1140-1144.
- Frackowiak, R.S.J., Friston, K.J., Frith, C.D., Dolan, R.J., & Mazziotta, J.C. (1997). *Human brain function*. San Diego, CA: Academic Press.
- Gabrieli, J.D.E., Desmond, J.E., Demb, J.B., Wagner, A.D., Stone, M.V., Vaidya, C.J., & Glover, G.H. (1996). Functional magnetic resonance imaging of semantic memory processes in the frontal lobes. *Psychological Science*, 7, 278-283.
- Gagnon, L., Goulet, P., Giroux, F., & Joannette, Y. (2003). Processing of metaphoric and non-metaphoric alternative meanings of words after right- and left-hemispheric lesion. *Brain and Language*, 87, 217-226.
- Gall, F.J., & Spurzheim, J.C. (1810). *Anatomie et physiologie du système nerveux en général et du cerveau en particulier, avec des observations sur la possibilité de reconnaître plusieurs dispositions intellectuelles et morales de l'homme et des animaux par la configuration de leur tête*. Volume 1. Paris: F. Schoell.
- Gardner, H., Brownell, H.H., Wapner, W., & Michelow, D. (1983). Missing the point: the role of the right hemisphere in the processing of complex linguistic materials. In E. Perecman (Ed.). *Cognitive processing in the right hemisphere*. New York: Academic Press.
- Gazzaniga, M.S. (1970). *The bisected brain*. New York: Appleton-Century-Croft.
- Gazzaniga, M.S. (1983). Right hemisphere language following brain bisection. A 20-year perspective. *American Psychologist*, 38, 525-537.

- Gazzaniga, M.S. (2000). Cerebral specialization and interhemispheric communication: does the corpus callosum enable the human condition? *Brain*, *123*, 1293-1326.
- Gazzaniga, M.S., Ledoux, J.E., & Wilson, D.H. (1977). Language, praxis and the right hemisphere: clues to some mechanisms of consciousness. *Neurology*, *27*, 1144-1147.
- Gazzaniga, M.S., Smylie, C.S., Baynes, K., Hirst, W., & McCleary, C. (1984). Profiles of right hemisphere language and speech following brain bisection. *Brain and Language*, *22*, 206-220.
- Gernsbacher, M.A., & Kaschak, M.P. (2003). Neuroimaging studies of language production and comprehension. *Annual Review of Psychology*, *54*, 91-114.
- Geschwind, N., & Levitsky, W. (1968). Human brain: left-right asymmetries in temporal speech region. *Science*, *161*, 186-187.
- Gold, B.T., & Buckner, R.L. (2002). Common prefrontal regions coactivate with dissociable posterior regions during controlled semantic and phonological tasks. *Neuron*, *35*, 803-812.
- Gordon, H.W. (1980). Right hemisphere comprehension of verbs in patients with complete forebrain commissurotomy: use of the dichotic method and manual performance. *Brain and Language*, *11*, 76-86.
- Grossman, M., Smith, E.E., Koenig, P., Glosser, G., DeVita, C., Moore, P., & McMillan, C. (2002). The neural basis for categorization in semantic memory. *NeuroImage*, *17*, 1549-1561.
- Habib, M. (1998). *Bases neurologiques des comportements* (3e éd.). Paris: Masson.
- Hannequin, D., Goulet, P., & Joannette, Y. (1987). *Hémisphère droit et langage*. Paris: Masson.
- Heim, St., Opitz, B., Muller, K., & Friederici, A.D. (2003). Phonological processing during language production: fMRI evidence for a shared production-comprehension network. *Cognitive Brain Research*, *16*, 285-296.
- Hellige, J.B. (1996). Divided visual field techniques. In J.G. Beaumont, P.M. Knealy & M.J.C. Rogers (Eds.). *The Blackwell dictionary of neuropsychology*. Cambridge, MA: Blackwell.

- Hines, D. (1976). Recognition of verbs, abstract nouns and concrete nouns from the left and right visual half-fields. *Neuropsychologia*, 14, 211-216.
- Holland, G.N., Hawkes, R.C., & Moore, W.S. (1980). Nuclear magnetic resonance (NMR) tomography of the brain: coronal and sagittal sections. *Journal of Computer Assisted Tomography*, 4, 429-433.
- Hughlings-Jackson, J. (1884). The croonian lectures on evolution and dissolution of the nervous system. *British Medical Journal*, 1, 591-593. Repris en 1958 in J. Taylor (Ed.). *Selected writings of John Hughlings Jackson*. London: Staples Press.
- Joannette, Y. (1989). Aphasia in left-handers and crossed aphasia. In F. Boller & J. Grafman (Eds.). *Handbook of neuropsychology II*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers.
- Joannette, Y., & Ansaldo, A.I. (2001). Aphasie et troubles de la communication verbale de nature non aphasique chez les cérébrolésés droits: le paradoxe. *Aphasie et domaines associés*, 15, 7-28.
- Joannette, Y., & Goulet, P. (1988). Word-naming in right-brain-damaged subjects. In C. Chiarello (Ed.). *Right hemisphere contributions to lexical semantics*. New York: Springer Verlag.
- Joannette, Y., & Goulet, P. (1998). Right hemisphere and the semantic processing of words: is the contribution specific or not? In E.G. Visch-Brink & R. Bastiaanse (Eds.). *Linguistic levels in aphasiology*. San Diego, CA: Singular Publishing Group Inc.
- Joannette, Y., Goulet, P., & Hannequin, D. (1990). *Right hemisphere and verbal communication*. New York: Springer Verlag.
- Joannette, Y., Goulet, P., & Le Dorze, G. (1988). Impaired word naming in right-brain-damage right handers: errors types and time courses analysis. *Brain and Language*, 34, 54-64.
- Kapur, S., Rose, R., Liddle, P.F., Zipursky, R.B., Brown, G.M., Stuss, D., Houle, S., & Tulving, E. (1994). The role of the left prefrontal cortex in verbal processing: semantic processing or willed action? *NeuroReport*, 5, 2193-2196.
- Kleist, K. (1934). *Gehirnpathologie vornehmlich auf Grund der Kriegserfahrungen*. Leipzig: Johannes Ambrosius Barth.

- Koivisto, M., & Laine, M. (1999). Strategies of semantic categorization in the cerebral hemispheres. *Brain and Language*, 66, 341-357.
- Le Bihan, D. (1997). L'imagerie fonctionnelle par résonance magnétique. In S. Dehaene (Ed.). *Le cerveau en action*. Paris: Presses universitaires de France.
- Le Moal, M., Tassin, J.P., & Baron, J.C. (1994). Neuroanatomie fonctionnelle et le problème des relations structures fonctions. In X. Seron & M. Jeannerod (Eds.). *Neuropsychologie humaine*. Bruxelles: Mardaga.
- Le Petit Robert (1990). Paris: les dictionnaires Le Robert.
- LeBlanc, B., & Joannette, Y. (1996). Unconstrained oral naming in left- and right-hemisphere-damaged patients: an analysis of naturalistic semantic strategies. *Brain and Language*, 55, 42-45.
- Lichtheim, L. (1885). On aphasia. *Brain*, 7, 433-484.
- Mazoyer, B.M., Tzourio, N., Frak, V., Syrota, A., Murayama, N., & Levrier, D. (1993). The cortical representation of speech. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 5, 467-479.
- McDermott, K.B., Petersen, S.E., Watson, J.M., & Ojemann, J.G. (2003). A procedure for identifying regions preferentially activated by attention to semantic and phonological relations using functional magnetic resonance imaging. *Neuropsychologia*, 41, 293-303.
- Mesulam, M.M. (1990). Large-scale neurocognitive networks and distributed processing for attention, language, and memory. *Annals of Neurology*, 28, 597-613.
- Monetta, L., & Joannette, Y. (2003). The specificity of the contribution of the right hemisphere to verbal communication: the cognitive resources hypothesis. *Journal of Medical Speech and Language Pathology*, 11, 203-211.
- Mummery, C.J., Shallice, T., & Price, C.J. (1999). Dual-process model in semantic priming: a functional imaging perspective. *NeuroImage*, 9, 516-525.
- Ojemann, J.G., Buckner, R.L., Akbudak, E., Snyder, A.Z., Ollinger, J.M., McKinstry, R.C., Rosen, B.R., Petersen, S.E., Raichle, M.E., & Conturo, T.E. (1998). Functional MRI studies of word stem completion: reliability across laboratories and comparison to blood flow imaging with PET. *Human Brain Mapping*, 6, 203-215.

- Paivio, A., Yuille, J.C., & Madigan, S.A. (1968). Concreteness, imagery, and meaningfulness values for 925 nouns. *Journal of Experimental Psychology*, 76, 1-25.
- Perani, D., Cappa, S.F., Schnur, T., Tettamanti, M., Collina, S., Rosa, M.M., & Fazio, F. (1999). The neural correlates of verb and noun processing: a PET study. *Brain*, 122, 2337-2344.
- Petersen, S.E., Fox, P.T., Posner, M.I., Mintun, M., & Raichle, M.E. (1988). Positron emission tomographic studies of the cortical anatomy of single-word processing. *Nature*, 331, 585-589.
- Pilgrim, L.K., Fadili, J., Fletcher, P., & Tyler, L.K. (2002). Overcoming confounds of stimulus blocking: an event-related fMRI design of semantic processing. *NeuroImage*, 16, 713-723.
- Poldrack, R.A., Temple, E., Protopapas, A., Nagarajan, S., Tallal, P., Merzenich, M., & Gabrieli, J.D. (2001). Relations between the neural bases of dynamic auditory processing and phonological processing: evidence from fMRI. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13, 687-697.
- Poldrack, R.A., Wagner, A.D., Prull, M.W., Desmond, J.E., Glover, G.H., & Gabrieli, J.D. (1999). Functional specialization for semantic and phonological processing in the left inferior prefrontal cortex. *NeuroImage*, 10, 15-35.
- Posner, M.I. (1993). Seeing the mind. *Science*, 262, 673-674.
- Price, C.J. (2000). The anatomy of language: contributions from functional neuroimaging. *Journal of Anatomy*, 197, 335-359.
- Price, C.J., Wise, R.J.S., Warburton, E.A., Moore, C.J., Howard, D., Patterson, K., Frackowiak, R.S.J., & Friston, K.J. (1996). Hearing and saying: the functional neuroanatomy of auditory word processing. *Brain*, 119, 919-931.
- Pugh, K.R., Shaywitz, B.A., Shaywitz, S.E., Shankweiler, D.P., Katz, L., Fletcher, J.M., Skudlarski, P., Fulbright, R.K., Constable, R.T., Bronen, R.A., Lacadie, C., & Gore, J.C. (1997). Predicting reading performance from neuroimaging profiles: the cerebral basis of phonological effects in printed word recognition. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23, 299-318.

- Purcell, E.M., Torrey, H.C., & Pound, R.V. (1946). Resonance absorption by nuclear magnetic moments in a solid. *Physical Review*, *69*, 37-38.
- Raichle, M.E., Fiez, J.A., Videen, T.O., MacLeod, A.M., Pardo, J.V., Fox, P.T., & Petersen, S.E. (1994). Practice-related changes in human brain functional anatomy during nonmotor learning. *Cerebral Cortex*, *4*, 8-26.
- Roy, C.S., & Sherrington, C.S. (1890). On the regulation of the blood supply of the brain. *The Journal of Physiology*, *11*, 85-108.
- Ruff, S., Marie, N., Celsis, P., Cardebat, D., & Démonet, J.F. (2003). Neural substrates of impaired categorical perception of phonemes in adult dyslexics: an fMRI study. *Brain and Cognition*, *53*, 331-334.
- Schlosser, M.J., Aoyagi, N., Fulbright, R.K., Gore, J.C., & McCarthy, G. (1998). Functional MRI studies of auditory comprehension. *Human Brain Mapping*, *6*, 1-13.
- Segalowitz, S.J., & Chevalier, H. (1998). Event-related potential (ERP) research in neurolinguistics. Part I: techniques and applications to lexical access. In B. Stemmer & H.A. Whitaker (Eds.). *Handbook of neurolinguistics*. San Diego, CA: Academic Press.
- Seidenberg, M.S. (1987). Sublexical structures in visual word recognition: access units or orthographic redundancy? In M. Coltheart (Ed.). *Attention and performance XII: The psychology of reading*. London: Erlbaum.
- Seidenberg, M.S., & McClelland, J.L. (1989). A distributed developmental model of word recognition and naming. *Psychological Review*, *96*, 523-568.
- Semmes, J. (1968). Hemispheric specialization: a possible clue to mechanism. *Neuropsychologia*, *6*, 11-26.
- Sergent, J. (1982). The cerebral balance of power: confrontation or cooperation? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *8*, 253-272.
- Sergent, J. (1994). Spécialisation fonctionnelle et coopération des hémisphères cérébraux. In X. Seron & M. Jeannerod (Eds.). *Neuropsychologie humaine*. Liège: Mardaga.

- Sidtis, J.J., Volpe, B.T., Wilson, D.H., Rayport, M., & Gazzaniga, M.S. (1981). Variability in right hemisphere language function after callosal section: evidence for a continuum of generative capacity. *Journal of Neuroscience*, 1, 323-331.
- Sperry, R.W. (1968). Hemisphere deconnection and unity in conscious awareness. *American Psychologist*, 23, 723-733.
- Taylor, J., Holmes, G.M., & Walshe, F.M.R. (1932). *Selected writings of John Hughlings Jackson*. London: Hodder and Stoughton.
- Thompson-Schill, S.L., Aguirre, G.K., D'Esposito, M., & Farah, M.J. (1999). A neural basis for category and modality specificity of semantic knowledge. *Neuropsychologia*, 37, 671-676.
- Tompkins, C.A. (1995). *Right hemisphere communication disorders: theory and management*. San Diego, CA: Singular Publishing.
- Trope, I., Rozin, P., Kemler Nelson, D., & Gur R.C. (1992). Information processing in the separated hemispheres of callosotomy patients: does the analytic-holistic dichotomy hold? *Brain and Cognition*, 19, 123-147.
- Vandenberghe, R., Price, C., Wise, R., Josephs, O., & Frackowiak R.S. (1996). Functional anatomy of a common semantic system for words and pictures. *Nature*, 383, 254-256.
- Villringer, A., & Dirnagl, U. (1995). Coupling of brain activity and cerebral blood flow: basis of functional neuroimaging. *Cerebrovascular & Brain Metabolism Reviews*, 7, 240-276.
- Vitali, P., Tettamanti, M., Abutalebi, J., Danna, M., Ansaldo, A.I., Perani, D., Cappa, S., & Joanette, Y. (2003). Recovery from anomia. Effects of specific rehabilitation on brain reorganisation: an er-fMRI study in two anomic patients. *Brain and Language*, 87, 126-127.
- Viviani, P. (1994). Les habiletés motrices. In M. Richelle, J. Requin & M. Robert (Eds.). *Traité de psychologie expérimentale*. Paris: Presses universitaires de France.
- Warburton, E., Wise, R.J.S., Price, C.J., Weiller, C., Hadar, U., Ramsay, S., & Frackowiak, R.S. (1996). Noun and verb retrieval by normal subjects. Studies with PET. *Brain*, 119, 159-179.

- Warrington, E.K., & Taylor, A.M. (1978). Two categorical stages of object recognition. *Perception*, 7, 695-705.
- Wernicke, K. (1874). *Der aphasische Symptomenkomplex*. Breslau: Cohen and Weigert.
- Wernicke, K. (1908). The symptom-complex of aphasia. In A. Church (Ed.). *Diseases of the nervous system*. New York: D. Appleton and Co.
- Zaidel, E. (1978). Lexical organization in the right hemisphere. In P.A. Buser & A. Rougel-Buser (Eds.). *Cerebral correlates of conscious experience*. Amsterdam: Elsevier, North Holland Biomedical press.
- Zaidel, E. (1983). Disconnection syndrome as a model for laterality effects in the normal brain. In J.B. Hellige (Ed.). *Cerebral hemisphere asymmetry. Method, theory and application*. New York: Praeger Publishers.
- Zatorre, R.J., Evans, A.C., Meyer, E., & Gjedde, A. (1992). Lateralization of phonetic and pitch discrimination in speech processing. *Science*, 256, 846-849.
- Zatorre, R.J., Meyer, E., Gjedde, A., & Evans, A.C. (1996). PET studies of phonetic processing of speech: review, replication, and reanalysis. *Cerebral Cortex*, 6, 21-30.