



Thèse présentée pour obtenir le grade de  
Docteur de l'Université Louis Pasteur  
Strasbourg I

Thèse de Neuropsychologie  
Présentée le 17 Octobre 2007  
Par Mario Aparicio de la Concepción.

Étude neuropsychologique et neuroanatomofonctionnelle  
du traitement phonologique chez le lecteur sourd pré-  
lingual.

---

CNRS UMR 7191,

Laboratoire d'Imagerie et Neurosciences Cognitives (LINC)

**Membres du Jury**

**Dr. Marie-Noëlle Metz-Lutz**, LINC UMR 7191-ULP,  
Strasbourg

Directeur de thèse

**Dr. André Doufour**, LINC UMR 7191-ULP, Strasbourg

Rapporteur interne

**Pr. Jacqueline Leybaert**, LAPSE-ULB, Bruxelles

Rapporteur externe

**Pr. Philippe Peigneux**, UR2NF-ULB, Bruxelles

Rapporteur externe

**Pr. Daniel Grucker**, LINC UMR 7191-ULP, Strasbourg

Examineur



## REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier chaleureusement les membres de mon jury, Jacqueline Leybaert, André Dufour, Daniel Grucker et Philippe Peigneux d'avoir bien voulu lire et commenter mon travail ainsi que sa disposition pour m'écouter.

Je remercie en particulier Marie-Noëlle Metz-Lutz pour son accueil, sa confiance et sa grande disposition pendant tous ces trois années de thèse qui ont été une aventure magnifique. J'espère avoir rendu un peu de la confiance que t'as déposé en moi. Merci de tout cœur.

Elisabeth Demont pour son encouragement, ses bons conseils ainsi que son soutien professionnel et personnel que j'ai appréciée énormément.

Corine Marrer pour ses acquisitions précises et ses conversations amusantes

Daniel Gounot pour son soutien technique et ses appréciations toujours pointues et intelligentes.

Jack Foucher et Philippe Peigneux pour leur aide précieuse et généreuse dans la technique de l'IRMf. Cinq minutes avec des gens sages comme vous m'ont permis d'avancer des kilomètres dans un chemin qui est souvent long et solitaire. Merci pour cette bouffé d'air frais.

Les volontaires, sourds et entendants, qui ont participé à cette recherche et qui ont collaboré à l'avancement de mon travail.

Les interprètes Mme Bally et Julie pour sa disposition à côté des sujets sourds

La Caisse d'Association Familier (CAF) car elle m'a permis de continuer mes études durant la maîtrise et mon DEA. Sans son aide, je ne serais pas sûrement là, au moins dans les mêmes conditions.

Enfin, à tous les membres de mon laboratoire qui m'ont donné leur aide et qui ont permis que je sois arrivé jusqu'à ici. Merci à tous.



## **R E S U M E**

Le problème de l'illettrisme chez la personne sourde est un problème majeur qui touche près de 80 % des sourds congénitaux. La maîtrise de la phonologie étant un point essentiel pour l'apprentissage de la lecture, une meilleure connaissance du traitement de l'information phonologique par la personne sourde peut contribuer au développement de méthodes d'apprentissage appropriées. Dans ce travail de thèse, nous exposons trois analyses susceptibles d'apporter des éléments nouveaux à cette question. La première analyse qui s'appuie sur l'étude des erreurs dans un jugement visuel de rimes, indique que les faibles performances du sourd ne s'expliquent pas exclusivement par un traitement orthographique, mais en grande partie par un traitement phonologique erroné. La deuxième analyse, effectuée sur les données d'une étude en IRMf, suggère que ces erreurs phonologiques seraient liées à une surutilisation par le lecteur sourd de la voie phonologique du modèle à deux voies de la lecture. La troisième analyse propose que la surutilisation de la voie phonologique s'accompagne paradoxalement d'une mauvaise application des règles de conversion graphophonologique. Ces caractéristiques sont semblables à celles d'un sujet entendant mauvais lecteur et écartent l'hypothèse que les sourds développent un processus de lecture idiosyncrasique. Plus précisément, le patron d'activation en IRMf nous suggère que, lors de la lecture, le sourd a recours à un processus contrôlé dont le traitement serait analogue à celui d'une seconde langue. Enfin, nos résultats soutiennent l'adéquation d'une stimulation phonologique riche et précoce des jeunes sourds pour optimiser l'apprentissage de la lecture.

### **Mots clés**

Sourd ; lecture ; IRMf ; traitement phonologique ; jugement visuel de rimes ; décision lexicale ; modèle lecture à deux voies ;

## **A B S T R A C T**

Illiteracy in deaf is a major problem affecting among 80 % of the congenital deaf subjects. Phonological processing being critical for learning to read, it is essential to know how the deaf people deal with phonology. A better understanding of phonological processing in deaf people would be helpful to improve learning to read methods for deaf. In this thesis report, we outline three analyses, which are likely to give new elements to this issue. The first analysis was performed on the errors made by the deaf readers in a visual rhyming judgement. It showed that in deaf readers an erroneous phonological processing could significantly account for the rhyming errors rather than a predominant visual-orthographic processing. The second analysis was carried out using the data of an fMRI study of deaf and normal hearing readers. It suggests that within the two-route model of reading the phonological errors in the deaf readers are linked to an overuse of the grapho-phonological route. The third analysis indicates that the overuse of the grapho-phonological route goes paradoxically along with a wrong application of the grapho-phonological conversion rules. These features, which are typical of a normal hearing poor reader, dismiss the hypothesis that deaf reader could have built up an idiosyncratic reading processing. More precisely, the brain activation pattern of reading suggests that the deaf reader relies on a controlled processing similar to the one observed in subjects processing a second language. Finally, our results support the importance of an early and appropriate phonological stimulation to help learning to read in congenital deaf children.

### **Keywords**

Deaf, reading, fMRI, phonological processing, rhyming visual judgement, lexical decision, dual route model of reading







# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>13</b>
<b>A PARTIE THEORIQUE.....</b>	<b>17</b>
<b>A.1 LA PHONOLOGIE ET LES PHONÈMES.....</b>	<b>17</b>
<b>A.2 RELATION ENTRE PHONOLOGIE ET LECTURE.....</b>	<b>19</b>
A.2.1 Conscience phonologique et lecture.....	19
A.2.2 Conversion graphophonologique lexicale et lecture.....	20
A.2.3 Relation entre conscience phonologique et la CGP.....	21
A.2.4 La mémoire de travail et la lecture.....	21
A.2.5 Relation entre conscience phonologique et lecture chez le sourd.....	23
<b>A.3 PHONOLOGIE ET LECTURE LABIALE.....</b>	<b>25</b>
A.3.1 La perception multimodale de la parole.....	25
A.3.2 La phonologie acquise à travers la modalité visuelle : le langage parlé complété.....	27
<b>A.4 MODÈLE À DEUX VOIES DE LA LECTURE.....</b>	<b>29</b>
A.4.1 Description du modèle.....	29
A.4.2 Développement de la lecture dans le cadre du modèle de lecture à deux voies.....	32
<b>A.5 LECTURE ET NEUROIMAGERIE.....</b>	<b>34</b>
A.5.1 L'utilisation des données de la Neuroimagerie.....	35
A.5.2 Bases neuroanatomiques de la lecture.....	36
A.5.3 Neuroanatomie fonctionnelle du modèle de lecture à deux voies.....	39
A.5.4 Neuroanatomie de la lecture labiale et la voie pariéto-frontale.....	44
<b>A.6 LE SOURD ET LA LECTURE.....</b>	<b>47</b>
A.6.1 Les sourds, utilisent-ils la phonologie ?.....	47
A.6.2 La période sensible pour l'apprentissage de la langue.....	60
A.6.3 L'importance de la langue des signes pour l'acquisition de la langue orale.....	61
<b>A.7 HYPOTHESES DE TRAVAIL.....</b>	<b>64</b>
<b>B PARTIE EXPERIMENTALE.....</b>	<b>65</b>
<b>B.1 EXPERIENCE N° 1 : PROTOCOLE EN BLOC.....</b>	<b>67</b>
B.1.1 Méthode générale.....	67
B.1.2 Analyse n° 1 : usage de la phonologie chez le sourd ?.....	73
B.1.3 Analyse n° 2 : Une surutilisation de la voie phonologique ?.....	87

B.1.4	Analyse n° 3 : le lecteur sourd, emploie t-il la voie phonologique de façon efficace ? .....	117
B.1.5	Quelques résultats complémentaires autour du GFI .....	123
	<i>Proposition de recherche n° 1</i> .....	128
	<i>Proposition de recherche n° 2</i> .....	130
<b>B.2</b>	<b>EXPÉRIENCE ÉVÉNEMENTIELLE : UNE AMÉLIORATION PAR RAPPORT À</b>	
	<b>L'EXPÉRIENCE EN BLOC</b> .....	<b>131</b>
B.2.1	Introduction : nouvelles hypothèses.....	131
B.2.2	Méthodes de l'expérience événementielle.....	134
<b>C</b>	<b>DISCUSSION GENERALE</b> .....	<b>139</b>
<b>C.1</b>	<b>UN TRAITEMENT CONTRÔLÉ CHEZ LE SOURD</b> .....	<b>139</b>
	<i>Proposition de recherche n° 3</i> .....	143
<b>C.2</b>	<b>UN MODÈLE DE DEUXIÈME LANGUE CHEZ LE SOURD</b> .....	<b>143</b>
	<i>Proposition de recherche n° 4</i> .....	145
<b>C.3</b>	<b>UNE VOIE FRONTO-PARIETALE DES REPRESENTATIONS ARTICULATOIRES</b> .....	<b>145</b>
	<i>Proposition de recherche n° 5</i> .....	146
	<b>CONCLUSION</b> .....	<b>147</b>
	<b>RÉFÉRENCES</b> .....	<b>151</b>
	<b>TABLE DES MATIERES</b> .....	<b>166</b>

## ABREVIATIONS

AB	Aire de Brodmann
AC-PC	« Anterior Commissure – Posterior Commissure », Plan bicommissural
AMS	Aire motrice supplémentaire
CGP	Conversion graphophonologique
CpFM	Cortex préfrontal médian
EPI	Imagerie Écho-Planar
GFI	Gyrus frontal inférieur
IRMf	Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle
JOT	Jonction occipito-temporale
LPC	Langage parlé complété
LPI	Lobe pariétal inférieur
NRH	Non-rime homographe
NRNH	Non-rime non-homographe
p	page
RDI	Régions d'intérêt
RH	Rime homographe
RNH	Rime non-homographe
TE	Temps d'écho (paramètre d'acquisition des données en IRMf)
TR	Temps de Réponse



## INTRODUCTION GENERALE

L'illettrisme fait référence en France, aux personnes qui ont été scolarisées et qui n'ont pas acquis une maîtrise suffisante de la lecture et de l'écriture pour être autonomes dans les situations simples de la vie courante. Concernant ce problème, le sujet sourd se trouve dans une situation singulière de risque. En effet, en 1998 le rapport Gillot notait que 80 % des sourds profonds en France se trouvent en situation d'illettrisme. Ce chiffre est très élevé, surtout si on le compare au taux d'illettrisme dans la population globale, qui est autour de 9 %<sup>1</sup>. La lutte contre l'illettrisme est devenue un problème national, comme il a été évoqué par la loi de 29 Juillet de 1998 promue par le ministère d'éducation nationale contre les exclusions sociales.

### *Article 24*

« La lutte contre l'illettrisme fait partie de l'éducation permanente. L'État, les collectivités territoriales, les établissements d'enseignement public et privés, les associations ainsi que les entreprises y concourent chacun pour leur part. Les actions de lutte contre l'illettrisme sont des actions de formation... Les coûts de ces actions sont imputables au titre de l'obligation de participation au financement de la formation professionnelle... »

### *Article 149 :*

« La lutte contre l'illettrisme constitue une priorité nationale. Cette priorité est prise en compte par le service public de l'éducation ainsi que les personnes publiques et privées qui assurent une mission de formation ou action sociale. Tous les services publics contribuent de manière coordonnée à la lutte contre l'illettrisme dans leurs domaines d'actions respectifs. »

La difficulté particulière des sourds à l'égard de la lecture provient surtout du fait que la représentation écrite se base sur la langue orale, une langue que peu de sourds maîtrisent, ce qui soulève des questions relatives à la façon dont le sourd devrait aborder la lecture. Aujourd'hui, la méthode d'apprentissage de la lecture la plus répandue dans les écoles est l'apprentissage phonique, qui s'appuie sur les acquisitions phonologiques de l'enfant. D'autres méthodes, comme la méthode globale, ont été interdites par le ministère de l'éducation nationale en décembre 2005. Mais, il est vrai que la situation distinctive des

---

<sup>1</sup> Enquête publiée par l'ANLCI (Agence Nationale de Lutte Contre l'Illettrisme).

sourds conduit beaucoup d'enseignants à défendre l'utilité des méthodes d'apprentissage qui contourneraient la phonologie et qui seraient de ce fait, plus adaptées au contexte du sourd (par ex. globale, naturelle, gestuelle, etc.). Dans cette perspective, il serait nécessaire de trouver des indices qui signalent que le sourd pourrait ne pas utiliser la phonologie pour apprendre à lire.

Ce travail de thèse évalue la relation du sourd avec la phonologie à travers une analyse des données qui n'a pas été faite auparavant et qui permet d'approfondir plus cette relation. D'abord, dans l'analyse n° 1, en analysant les erreurs commises dans une tâche phonologique, comme le jugement visuel de rimes, nous essayons de répondre à la question de savoir si les faibles performances du sourd dans cette tâche phonologique sont causées par une tendance à éviter le traitement phonologique des mots écrits, ou par un traitement phonologique erroné. Ensuite, dans l'analyse n° 2, nous examinons les activations cérébrales en IRMf lors de la réalisation d'une tâche de jugement visuel de rimes et une autre de décision lexicale, afin de déterminer si le sourd utilise plus la voie phonologique ou la voie orthographique. Dans le premier cas, il se présenterait comme un lecteur « retardé » mais qui suivrait un processus analogue à celui d'un lecteur entendant ; dans le deuxième cas, il s'agirait d'une utilisation très particulière et idiosyncrasique du sourd car l'entendant n'utilise cette voie que lorsqu'il est devenu un lecteur expert, ce qui n'est pas du tout le cas du sujet sourd. Ces résultats sont complétés par l'analyse 3 qui tente d'évaluer si l'utilisation de la voie phonologique chez le sourd n'est pas accompagnée d'une difficulté dans l'application des règles de conversion graphophonologique, qui est le nœud de l'apprentissage de la lecture phonique. Enfin, dans la discussion générale, est évoquée la possibilité que ces nouvelles données soient compatibles avec l'idée que le lecteur sourd suit un processus phonologique contrôlé. Nous discutons aussi le fait que les données sont comparables à celles d'un sujet entendant mauvais lecteur qui traiterait une langue seconde. Des propositions de recherche sont exposées à partir de ces suggestions.

Avant d'entrer dans la partie expérimentale, une revue théorique sur les relations entre la lecture et la phonologie est faite. Premièrement, une introduction générale sur le concept de phonologie est présentée. Deuxièmement, le lien entre la phonologie et la lecture est abordé afin de justifier l'importance de la première lorsqu'on étudie la deuxième. Troisièmement, nous évoquons comment la phonologie peut être acquise à travers la modalité visuelle. En relation avec cela, nous évoquons comment le langage parlé complété qui est basé sur une combinaison de lecture labiale et gestuel, permet au sourd de développer des bonnes représentations phonologiques de la langue orale. Le point suivant est consacré à la présentation d'un des modèles les plus répandus de fonctionnement cognitif sous-tendant le processus de lecture : le modèle de lecture à deux voies. Dans la section suivante, les bases de la neuroanatomie fonctionnelle de la lecture chez l'entendant ainsi que les réseaux impliqués dans le modèle de lecture à deux voies sont décrits. Enfin, le dernier point de cette section expose quelques travaux de la littérature sur la phonologie chez le sourd, introduisant au même temps les questions auxquelles cette thèse essaie de répondre et les hypothèses que les analyses des données expérimentales tentent de vérifier et qui sont débattues dans la discussion générale.

Avant de commencer l'exposé de ce travail, il me paraît important de souligner que ceci est un travail de thèse. Par conséquent, un point de vue particulier qui découle des données expérimentales mais aussi d'une réflexion sur la question est exposé. Le contenu de la partie théorique a été choisi afin de cadrer la question soulevée dans ce travail et j'ai essayé de ne pas évoquer d'autres points concernant la personne sourde, certes intéressants mais qui n'ont pas de lien direct avec la question traitée dans ce travail. Le point de vue sera présenté à travers la partie expérimentale et la discussion générale mais il peut déjà se résumer ici très sommairement, à savoir, que le lecteur sourd qui n'a pas été suffisamment stimulé pendant son enfance pour acquérir les représentations phonologiques de la langue orale, aura un patron qualitativement semblable à celui d'un sujet entendant mauvais lecteur avec quelques caractéristiques s'apparentant à un processus de traitement d'une langue seconde.

Par conséquent il n'y aurait pas un patron idiosyncratique du sourd qui permettrait d'imaginer des méthodes alternatives et efficaces d'apprentissage de la lecture pour lui. Toutefois, ce point de vue n'est pas exposé de manière univoque ni de façon fermée et il pourra permettre, je l'espère, de générer des nouvelles recherches qui confirmeront ou non les suggestions de ce travail



# A PARTIE THEORIQUE

## A.1 LA PHONOLOGIE ET LES PHONÈMES

Lorsque nous regardons de façon superficielle une analyse spectrographique des sons d'un mot (par ex. rite), il est généralement impossible de distinguer les différents segments tandis qu'au niveau auditif nous percevons cette distinction sans problème (par ex. trois sons dans rite : /r/-/i/-/t/). Ceci suggère que la perception de la parole est un phénomène cognitivo-perceptuel et non une simple représentation directe du stimulus acoustique (Gleitman & Rozin, 1977). Ce phénomène se produit grâce à un processus de catégorisation qui permet de regrouper les différents sons de mots en phonèmes. Par exemple, le /r/ de « rite » ne sera pas le même son que le /r/ de « tarte », ou que le /r/ de « pareil ». Plus encore, un locuteur français peut rouler les /r/ alors qu'un autre ne les roulera pas. Cependant, nous allons catégoriser automatiquement tous ces /r/ comme un seul son, qui est le phonème /r/. Toutes ces variations d'un phonème sont appelées allophones. Nous pourrions donc considérer les différentes formes sonores de /r/ dans tarte, pareil ou rite comme des allophones d'un même phonème.

Ce décalage entre ce qui est observé au niveau physique dans le spectrogramme (i.e. l'acoustique des sons) et ce qui est perçu suggère l'idée d'un phonème comme une entité abstraite, qui peut embrasser plusieurs sons. En effet, le passage de la stimulation physique à la perception cognitive de la parole se fait à travers la représentation phonologique du mot qui sont des représentations abstraites des segments composant la langue (Marslen-Wilson, Nix, & Gaskell, 1995; Pallier, 2000). Elles seraient aussi des primitives linguistiques sans signification dont l'association crée des unités signifiantes (Frost, 1998)

Cet écart avec la réalité n'est pas un phénomène original ou exclusif de la parole. Nous pouvons le retrouver aussi dans beaucoup d'autres domaines liés à la psychologie, de la perception des couleurs jusqu'à la catégorisation sociale. Que ce soit une construction « donnée » à partir d'une réalité ou que ce soit une construction plus « volontariste » reste à

débattre. L'importance pour nous est de voir que les phonèmes représentent simultanément, le niveau basique lié à l'organisation de sons d'une langue et un phénomène perceptuel et de catégorisation cognitive assez complexe.

L'étude des phonèmes et de ses variations permettant de modifier la signification d'un mot de la langue est l'objet de la phonologie. Les phénomènes d'ordre phonologique ne se réduisent pas aux mots isolés mais peuvent concerner aussi les relations inter-lexicales (i.e. dans la phrase).

Le français contemporain compte environ trente-neuf phonèmes : 16 voyelles, 3 semi-consonnes et 20 consonnes.

## **A.2 RELATION ENTRE PHONOLOGIE ET LECTURE**

Pourquoi donnons-nous autant d'importance à la phonologie lorsque nous traitons le sujet de la lecture ? Existe-t-il une relation si substantielle entre la phonologie et la lecture ? La réponse est plutôt affirmative, et les implications sont très importantes, non seulement sur le plan théorique mais aussi sur le plan pratique. En effet, l'apprentissage de la lecture repose généralement sur l'utilisation de méthodes qui tiennent compte des aspects phonologiques. Cependant, et malgré la relation quasi séculaire entre phonologie et lecture, la configuration de ce lien n'est pas encore tout à fait précisée comme nous pourrions l'observer par la suite dans la présentation des études de la phonologie chez le sourd lecteur.

Trois aspects de la phonologie sont souvent liés à la lecture : la conscience phonologique, la conversion graphophonologique (CGP) et le recodage phonétique pour maintenir l'information en mémoire de travail. Nous allons les définir et tenter d'expliquer leur relation avec la lecture.

### **A.2.1 Conscience phonologique et lecture**

Qu'est-ce que la conscience phonologique ? Elle peut être définie comme la capacité qu'a le sujet d'accéder volontairement à son répertoire phonologique pour le manipuler. Il y a plusieurs tâches qui prétendent mesurer cette capacité mais nous ne citerons que les trois plus représentatives qui font référence aux sons du mot : la segmentation, l'assemblage et la prononciation à l'envers (Lewkowicz, 1980).

Les études sur la lecture ont établi, de façon quasi-systématique, des liens notables entre la conscience phonologique et l'efficacité en lecture chez l'enfant. Par exemple, une étude longitudinale auprès d'enfants suédois a mis en évidence l'existence de corrélations positives entre plusieurs mesures du niveau phonologique (segmentation des phonèmes, prononcer les phonèmes à l'envers, jugement de rime, etc.) à un âge pré-lecteur et la performance en lecture 2-3 ans plus tard (Lundberg, Olofsson, & Wall, 1980). Dans la même étude, la corrélation était non significative si on prenait les mesures au niveau de l'analyse

syllabique et non phonémique. Ces résultats suggèrent l'importance des capacités phonologiques chez l'enfant pour l'apprentissage de la lecture. Néanmoins, cette étude présente le problème commun de beaucoup d'études corrélationnelles : nous ne pouvons pas inférer une relation directe car il peut y exister une troisième variable inconnue qui intervient (*tertium quid*). Ce problème a été en partie surmonté dans l'étude de Bradley et Bryant (1983). Ces chercheurs réalisèrent une étude longitudinale de 4 ans mais, à la différence de Lundberg *et al.* (1980), ils ont commencé par appliquer un entraînement intensif aux enfants pré-lecteurs de 4-5 ans d'âge, à l'aide de deux tâches de conscience phonologique. De cette manière, ils cherchaient à vérifier la causalité des liens entre phonologie et lecture. Les tâches consistaient à catégoriser des sons des différents mots (présentés aux enfants avec des dessins) et à identifier les sons dans les lettres de l'alphabet. Les résultats montrent que les enfants qui reçoivent ce type d'entraînement ont de meilleures performances de lecture après 4 ans par rapport à ceux qui reçoivent un entraînement non-phonologique (catégorisation conceptuelle). Ce résultat suggère une relation de cause à effet entre le développement phonologique de l'enfant et ses performances de lecture plus tard (Bradley & Bryant, 1983). Ceci a été confirmé ultérieurement par plusieurs autres études (Mann, 1984; Mann & Liberman, 1984).

### **A.2.2 Conversion graphophonologique lexicale et lecture**

La conversion graphophonologique (CGP) est liée à la capacité du sujet à convertir les graphèmes en phonèmes propres d'une langue. Elle est mesurée souvent à travers la vitesse de dénomination (i.e. temps de réponse) de pseudomots. Les pseudomots sont des combinaisons de phonèmes qui n'ont pas de signification, ni d'identification lexicale mais qui partagent avec les mots toute la richesse phonologique du langage écrit. Afin de pouvoir décoder des pseudomots, le sujet doit être capable d'accéder et intégrer plusieurs codes phonologiques. Les résultats ont montré, de façon assez systématique, une différence dans cette tâche entre les mauvais et les bons lecteurs (Hogaboam & Perfetti, 1978; Perfetti & Hogaboam, 1975; Stanovich, 1982a, 1985), ce qui atteste l'importance de la CGP dans la

lecture. Toutefois, une relation directe et/ou directionnelle n'a pas pu être établie comme dans le cas de la conscience phonologique (Wagner & Torgesen, 1987).

### **A.2.3 Relation entre conscience phonologique et la CGP**

Étant donné que la conscience phonologique et la CGP ont un lien avec les capacités de lecture, nous pouvons nous demander quelle relation il y aurait entre la conscience phonologique et la CGP. La CGP est une procédure destinée particulièrement à décoder les éléments ayant un caractère lexical plus ou moins inédit, tandis que la conscience phonologique est mesurée avec des tâches plus variées qui manipulent généralement les éléments sous-lexicaux du mot. Mais en réalité, le chercheur paraît, dans les deux cas, sonder une habileté commune qui serait associée à la manipulation phonologique. De fait, quelques études en analyse de régression ont montré que la conscience phonologique et la CGP sont fortement liées et semblent pouvoir être expliquées par une capacité commune (Blachman, 1984; Mann & Liberman, 1984).

### **A.2.4 La mémoire de travail et la lecture**

La mémoire de travail peut être définie comme un système de stockage de capacité limitée qui soutient les traitements cognitifs en cours (Baddeley, 1981; Baddeley & Hitch, 1974). Plusieurs modèles de la mémoire de travail ont été proposés mais nous nous centrerons ici sur le modèle de Baddeley (Baddeley, 1982; Baddeley & Hitch, 1974; Mann & Liberman, 1984). Au moins trois sous-systèmes ont été définis dans ce modèle. Le premier serait un contrôleur central, utilisé afin d'effectuer les routines exécutives et/ou décisionnelles. Les deux autres sont des systèmes auxiliaires du contrôleur central et leur information est envoyée à celui-ci de manière à ce qu'il puisse la traiter. Ces systèmes auxiliaires dépendent du type d'information envoyée : visuo-spatiale ou verbale. Nous développerons ici uniquement la composante verbale. L'information verbale est envoyée vers une boucle qui est capable de la réactiver si cela est nécessaire pour la tâche en cours. Cette boucle est appelée phonologique car elle code et stocke cette information sous une forme

phonologique. La nature phonologique de cette boucle a été inférée principalement des résultats qui montrent que la mémorisation des séquences de lettres phonologiquement similaires (par ex. B, C, T, P) est plus difficile que celle d'une séquence dont les éléments n'auraient pas ce type de relation phonologique (par ex. A, M, S, Q) (Shankweiler, Liberman, Mark, Fowler, & Fischer, 1979). Le stockage dans la boucle phonologique dépend de l'entrée de l'information. Si elle est auditive, elle est enregistrée automatiquement dans la boucle, mais si elle est écrite, la boucle aurait recours à un recodage de type articulatoire, généralement à travers la sous-vocalisation (Baddeley, 1982).

Le recodage et le niveau de lecture semblent avoir une relation de cause à effet (Mann, 1984; Mann & Liberman, 1984), ce qui suggère qu'un enfant ayant de mauvaises performances en mémoire de travail aurait des difficultés pour acquérir ultérieurement un bon niveau de lecture. D'autres études ont essayé de déterminer de façon précise la nature du lien entre mémoire de travail et lecture. Ces études ont sélectionné des enfants mauvais lecteurs qui avaient simultanément des problèmes en mémoire de travail. Elles ont mis en évidence une différence, par rapport aux bons lecteurs, dans plusieurs comportements liés à la stratégie de recodage lors de la réalisation d'une tâche de mémoire de travail (Bauer, 1977, 1979; Torgesen, 1977a). Par exemple, Torgesen (1977a) a réalisé chez des enfants une tâche de rappel séquentiel avec sept cartes représentant des objets verbalisables. Les cartes étaient masquées derrière un miroir opaque mais les enfants pouvaient regarder les différentes cartes en appuyant sur le bouton correspondant autant de fois qu'ils le voulaient. Cependant, il n'était possible de les regarder qu'une par une pendant un certain temps. Au cours de cette période, Torgesen a évalué chez les enfants des comportements comme le regard, la dénomination de cartes (à partir de l'observation des sons et des mouvements des lèvres), les gestes du corps (rythmique ou non) et la verbalisation en dehors de l'observation de cartes. D'autres comportements examinés étaient liés à la séquence, comme l'exécution d'une pause entre l'observation de cartes ou la création de la part de l'enfant de courtes séquences d'observation (entre deux et quatre cartes). Tous ces comportements sont

considérés comme des indices d'une application flexible et active d'une stratégie de recodage efficiente (Torgesen, 1977a, 1977b) et plusieurs études ont trouvé une diminution significative de ces comportements chez les mauvais lecteurs par rapport aux bons lecteurs (Bauer, 1977, 1979; Butterfield & Wambold, 1973). De plus, l'entraînement de quelques procédés stratégiques de recodage améliore la performance des mauvais lecteurs jusqu'à supprimer l'écart par rapport aux bons lecteurs. Par exemple, Torgesen a employé une technique de répétition cumulée (« cumulative rehearsal »), qui consistait à forcer les enfants à faire le rappel par petits groupes avant de l'inclure dans un groupe plus grand (Torgesen, 1977a). Un autre exemple est celui de Torgesen & Houck (1980) qui ont utilisé une technique de regroupement temporel (« temporal chunking »), consistant à forcer l'enfant à faire plusieurs rappels systématiques dans la période d'observation (Torgesen & Houck, 1980). L'entraînement de ces techniques a amélioré ultérieurement les performances de lecture. Ces résultats suggèrent que la mauvaise performance de lecture de certains enfants mauvais lecteurs serait due à une utilisation inefficace des stratégies de recodage. Cette idée sera reprise dans l'analyse 3 lorsque nous constaterons que le sourd paraît avoir une difficulté dans l'usage des règles phonologiques.

### **A.2.5 Relation entre conscience phonologique et lecture chez le sourd**

Nous venons de voir chez l'entendant l'existence d'une relation entre phonologie et lecture. En ce qui concerne le lecteur sourd, nous pouvons trouver quelques études qui montrent l'existence de corrélations entre la performance phonologique et la lecture (Campbell & Wright, 1988; Waters & Doehring, 1990). Par exemple, Waters et Doehring (1990) ont trouvé à travers une analyse de régression multiple, de fortes relations entre des mesures de production phonologique et la performance en lecture chez le jeune sourd (7-20 ans). Des résultats semblables ont été mis en évidence par Campbell et Wright (1988) qui ont montré une corrélation significative entre la performance à une tâche phonologique, comme le jugement de la rime, et la lecture, et par Dyer *et al.* (2003) qui ont trouvé chez des enfants de

13 ans un lien entre d'une part la conscience et le décodage phonologiques et d'une autre part le niveau de lecture (Dyer, MacSweeney, Szczerbinski, Green, & Campbell, 2003).

Toutefois, ces études ne sont pas longitudinales et ne permettent pas par conséquent d'évaluer une éventuelle relation entre les capacités phonologiques et la performance de la lecture à un moment ultérieur. Une évaluation de ce type chez le sourd a été réalisée par Harris et Beech (1998). Ces auteurs ont composé un groupe de sujets entendants et un autre de sourds qui, au moment de la première mesure, sont appariés en âge (moyenne = 5 ans) et en niveau de performances de lecture<sup>2</sup>. Une première mesure de la conscience phonologique est réalisée six mois plus tard, à un âge moyen de 5;6 ans, et nous observons déjà une différence significative entre entendants et sourds ( $p < 0.002$ ). Par la suite, deux mesures de la lecture ont été faites un an et deux ans après la première évaluation et elles montrent aussi des différences significatives entre sourds et entendants ( $p < 0.001$ ). Mais, ce qui est intéressant de souligner ici, est que ces deux scores de lecture possèdent chez le sourd une corrélation partielle<sup>3</sup> légèrement significative avec la conscience phonologique ( $r = 0.43$  à  $p < 0.02$  et  $r = 0.37$  à  $p < 0.09$ ). Ces résultats suggèrent qu'il existe chez le sourd une relation entre les habiletés de type phonologique et la lecture. Toutefois, ces corrélations restent inférieures à celles trouvées auprès du groupe contrôle composé d'enfants entendants ( $0.57$  à  $p < 0.001$ ).

---

<sup>2</sup> La lecture est mesurée à cet âge par une version d'un test adaptée aux débutants : « Primary Reading Test : Level 1a » (France, 1981)

<sup>3</sup> Les auteurs ont éliminé l'éventuelle influence des capacités cognitives générales, mesurées par le QI, dans le calcul de la corrélation



## **A.3 PHONOLOGIE ET LECTURE LABIALE**

### **A.3.1 La perception multimodale de la parole**

Grâce au caractère fortement abstrait du système phonologique, il n'est pas surprenant de découvrir qu'il peut se construire à partir d'autres modalités perceptives que la perception auditive, comme la perception visuelle ou kinesthésique. Nous allons examiner ici l'influence de la modalité visuelle à travers la lecture labiale, car il s'agit d'une question essentielle pour comprendre l'acquisition de la phonologie chez le sourd. Cependant, d'autres modalités, comme la modalité tactile, peuvent également influencer la perception de la parole (Fowler & Dekle, 1991)

L'information visuelle obtenue à partir de la lecture labiale est importante pour la perception de la parole. En effet, il est accepté depuis longtemps que le fait de regarder le visage de son interlocuteur augmente l'intelligibilité de la parole (Sumbly & Pollack, 1954). Mais l'impact de la modalité visuelle a été particulièrement mis en évidence avec l'effet McGurk (McGurk & MacDonald, 1976). Cet effet se produit lorsque nous présentons à un sujet une vidéo montrant une personne prononçant une syllabe (ex. /ga/) alors que la bande sonore diffuse l'enregistrement d'une autre syllabe (ex. /ba/) : le sujet a alors l'impression d'entendre un troisième phonème intermédiaire (ex. /da/). L'effet McGurk est très robuste puisqu'il subsiste même lorsque nous demandons aux sujets de dire ce qu'ils ont entendu plutôt que ce que le locuteur dit (Summerfield & McGrath, 1984) et il continue à apparaître même en présence d'un fort décalage spatial (Jones & Munhall, 1996) ou temporel (Munhall, Gribble, Sacco, & Ward, 1996) entre les informations fournies par les modalités visuelle et auditive. Il est important de souligner que le type d'information fourni par la lecture labiale est indépendante (c'est-à-dire non influencée) de celle donnée par l'identification, la familiarité ou les traits émotionnels des visages (Campbell, Brooks, de Haan, & Roberts, 1996).

Néanmoins, il a été montré que bien que l'influence de la modalité visuelle soit manifeste dans la perception de la parole, elle n'est pas indispensable à l'acquisition d'une bonne

perception de la parole. En effet, des études chez des enfants aveugles montrent que, après trois ans, ils n'ont pas une confusion plus grande que l'enfant voyant au niveau de la discrimination phonologique, y compris pour des phonèmes qui sont plus faciles à différencier au niveau visuel qu'au niveau acoustique (par ex. /m/ et /n/) (Mills, 1987). Plus récemment, il a été observé que, même les discriminations auditives de la parole chez des aveugles congénitaux sont plus rapides que celles des voyants (Röder, Rosler, & Neville, 2000). Du fait du caractère non indispensable de la lecture labiale, nous pourrions nous demander si l'information fournie à travers la modalité visuelle de la perception de la parole reste alors une simple modification de ce que le récepteur perçoit auditivement ou si elle va au-delà et participe, comme le système auditif, directement à la construction du système de représentation phonologique (i.e. des phonèmes). Plusieurs expériences en mémoire à court terme montrent que la performance de rappel en lecture labiale est aussi bien influencée par des mécanismes phonologiques comme l'est la modalité auditive (Campbell & Dodd, 1980; Spoehr & Corin, 1978), ce qui suggère que la lecture labiale, laisse une trace sensorielle qui est prise en compte par les mécanismes de traitement de l'information phonologique (Alegria & Leybaert, 2005).

Pour résumer, la lecture labiale fait partie intégrante de la perception de la parole et elle joue un rôle pour le développement du système phonologique (Dodd, 1987). Toutefois, les informations phonologiques fournies exclusivement par la lecture labiale sont insuffisantes pour le développement du langage et l'établissement de représentations phonologiques de qualité. Ceci est particulièrement vrai pour la personne sourde qui, très souvent, subit les conséquences d'une exposition exclusive à la lecture labiale. Pour le sourd, il serait donc très utile de trouver un système visuel capable de fournir toute l'information phonologique. Cette idée est à la base de la création du langage parlé complété.

### **A.3.2 La phonologie acquise à travers la modalité visuelle : le langage parlé complété**

Le langage parlé complété (LPC) a été mis au point par Cornett (Cornett, 1967) et introduit par René Dissoubay en 1975 dans sa version française (Institut National des Jeunes Sourds, Paris). Ce système, qui est complètement différent de la langue des signes, comporte une série de configurations manuelles combinées aux mouvements de lèvres qui, en principe, lève toutes les ambiguïtés de la lecture labiale et permet donc théoriquement de surmonter les difficultés posées par celle-ci et ainsi d'acquérir le système phonologique (Alegria & Leybaert, 2005). Par conséquent, l'application du LPC devrait pouvoir améliorer considérablement les performances en lecture ainsi que les scores aux tâches phonologiques. En effet, plusieurs expériences montrent comment l'utilisation précoce et intensive du LPC permet à l'enfant sourd de devenir un bon lecteur et d'acquérir des performances similaires aux entendants dans des tâches phonologiques comme le jugement visuel de rimes (Charlier & Leybaert, 2000), la génération de rimes (LaSasso, Crain, & Leybaert, 2003) ou la mémoire phonologique de travail (Leybaert & Charlier, 1996), qui sont généralement liées à un bon niveau de lecture chez l'enfant. De plus, les enfants sourds éduqués en LPC sont capables d'identifier la version écrite des mots correspondants rencontrés pour la première fois, ce qui indique que ces sourds utilisent efficacement les règles phonologiques acquises (Alegria, Dejean, Capouillez, & Leybaert, 1990).

Les résultats montrent qu'une stimulation phonologique visuelle appropriée, comme le LPC, peut conduire le sourd à un bon niveau de lecture et cela à travers des compétences phonologiques comparables à celles que possèdent les entendants. Enfin, il paraît intéressant de souligner que ces études montrent l'aspect suffisant de l'acquisition phonologique chez le sourd afin d'acquérir une bonne performance de la lecture. Néanmoins, elles ne démontrent pas que la phonologie est nécessaire pour la lecture. De plus, il peut y avoir d'autres méthodes que le sourd pourrait développer, donnant lieu à des stratégies alternatives pour parvenir à lire, méthodes qui contourneraient la phonologie et qui

seraient enfin mieux adaptées à la « nature » du sourd comme par exemple les méthodes de type global ou la méthode gestuelle. Les méthodes dites globales consistent à faire reconnaître aux enfants le mot comme un ensemble avant d'en analyser les éléments et par conséquent sans passer par une conversion graphophonologique (Decroly, 1927). La méthode de lecture gestuelle se base sur de gestes associés aux sons des mots (Borel-Maisonny, 1985).

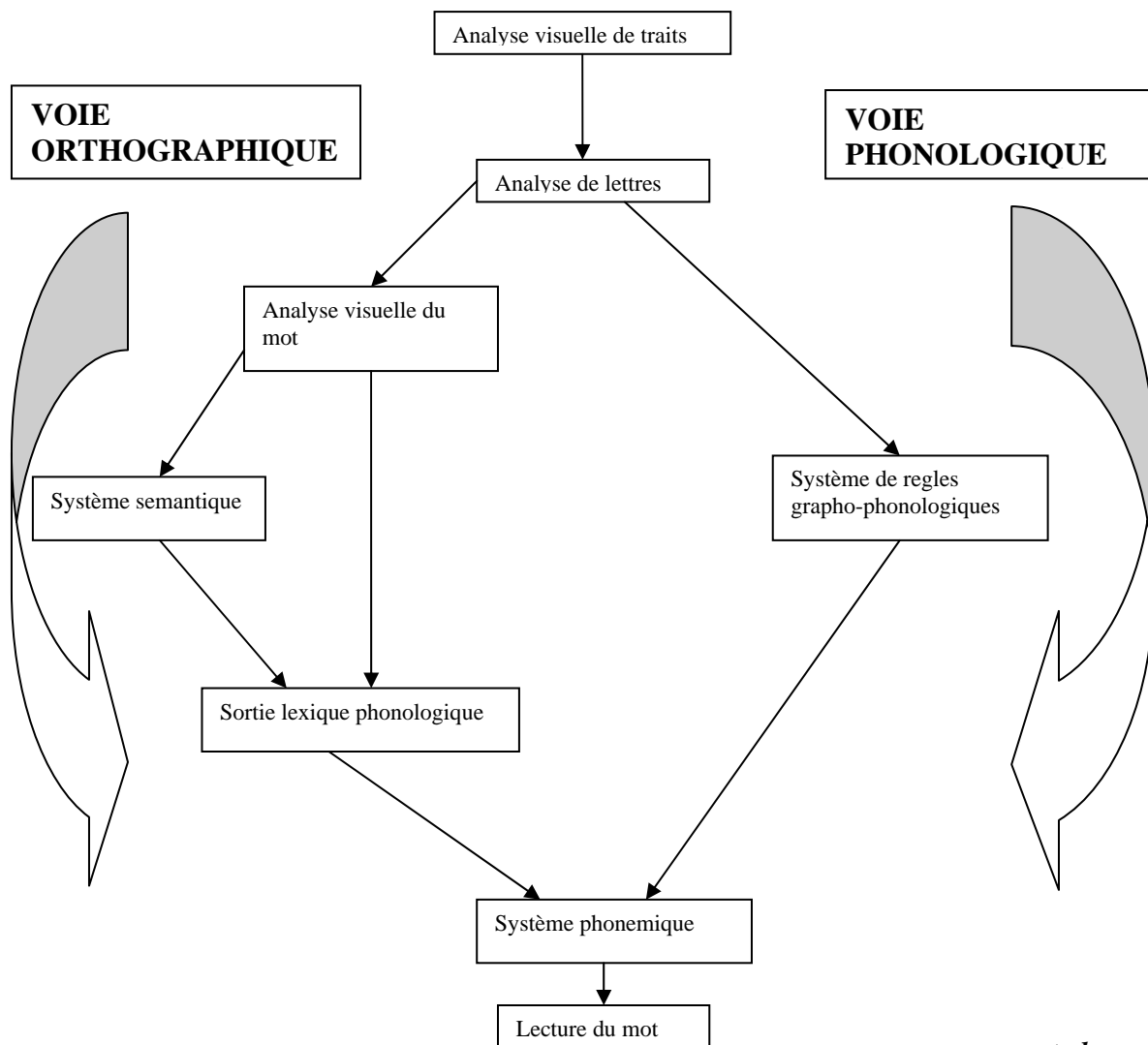
## **A.4 MODÈLE À DEUX VOIES DE LA LECTURE**

Afin d'expliquer les processus de lecture chez les sourds (et les entendants), nous utilisons un modèle qui postule l'existence conjointe de deux procédures de reconnaissance des mots. Le choix de ce modèle a été fait principalement pour deux raisons. La première est que son architecture et son caractère explicatif permettent de discriminer très clairement entre différentes hypothèses concernant l'utilisation de mécanismes de traitement du langage écrit chez le sourd (phonologiques vs orthographiques). La deuxième est que de nombreuses études parmi les travaux neuropsychologiques s'intéressant à la lecture chez le sourd ont adopté ce modèle comme cadre théorique. Son utilisation ici nous permet de les comparer plus aisément avec nos résultats.

Enfin, ce travail ne prétend pas mettre en avant ce modèle par rapport à d'autres modèles (par ex. connexionnistes) qui se développent depuis une vingtaine d'années et qui proposent une seule voie pour reconnaître les mots quelles que soient leurs caractéristiques (Plaut, McClelland, Seidenberg, & Patterson, 1996; Seidenberg & McClelland, 1989).

### **A.4.1 Description du modèle**

L'idée principale du modèle de lecture à deux voies est que le lecteur a à sa disposition deux procédures pour accéder aux caractéristiques du mot à partir de sa forme écrite (Coltheart, Curtis, Atkins, & Haller, 1993). Une voie, appelée orthographique, directe, ou voie d'adressage permet au lecteur d'identifier l'ensemble du mot, sans avoir besoin de le segmenter préalablement. L'autre voie, appelée phonologique, indirecte ou voie d'assemblage, s'appuie sur la conversion graphophonologique (CGP). Plus précisément, le mot est segmenté en graphèmes qui seront convertis un à un en phonèmes (par ex. *ch-a-p-eau* : /G/-/a/-/p/-/o/) (voir figure 1 ; p. 30).



Coltheart *et al.* 1993

**Figure 1** Modèle de lecture à deux voies d'après Coltheart *et al.* (1993)  
Par raisons de simplicité, seules les connexions en avant (« forward ») sont indiquées.

La conversion de la voie phonologique se réalise à travers des règles graphophonologiques qui ont eu la possibilité de s'apprendre préalablement car elles possèdent une fréquence élevée de correspondance entre le graphème et le phonème. Par exemple, le graphème *ch* correspond au phonème /G/, comme dans « chapeau », dans 96,64 % des cas, au phonème /k/, comme dans « orchestre », dans 3,11 % des cas, au phonème /tG/ comme dans « sandwich » dans 0,18 % des cas, et au silence, comme dans « yacht », dans 0.07

%<sup>4</sup>. Dans la rencontre répétée des mots écrits, le lecteur, dès un jeune âge, crée des régularités concernant la relation entre les graphèmes et les phonèmes (par exemple *ch* avec /G/). Ces régularités vont conduire à des règles de conversion graphophonologiques qui pourront être appliquées ensuite à d'autres mots qui suivent les mêmes règles (i.e. mots réguliers) (Gombert & Peereman, 2001). Cette voie est importante pour l'identification des mots non familiers ou de basse fréquence dont l'application des règles de CGP nous permettra le décodage. Cette voie sera aussi essentielle lorsque nous devrons rejeter les pseudomots (i.e. combinaison de lettres alphabétiques phonologiquement plausibles mais qui ne forment pas un élément lexical) dans une décision lexicale, ce qui nous permet de les discriminer et les écarter par rapport aux mots. En revanche, la voie orthographique identifie les mots familiers ou de haute fréquence et est particulièrement importante pour les mots irréguliers ou inconsistants qui ne suivent pas strictement les règles de la CGP. En effet, ces mots contiennent des graphèmes qui ne correspondent au phonème habituel (par ex. le mot « femme » où le graphème *e* représente le phonème /a/). Il est intéressant d'indiquer le fait que la sémantique ne paraît pas nécessaire pour l'identification du mot à travers la voie orthographique (voir figure 1 ; p. 30). C'est pour cela que les auteurs du modèle parlent aussi d'une « troisième voie » issue de la voie orthographique (i.e. identification directe sans système sémantique). En effet, selon le modèle de Coltheart l'identification du mot dans la voie orthographique est possible sans faire appel au système sémantique.

Il est important de signaler que les deux voies (orthographique et phonologique) arrivent au système phonémique du mot (voir figure 1 ; p. 30), ce qui permet son éventuelle identification non seulement au niveau phonologique, mais aussi orthographique du mot. Une confusion courante consiste à identifier la voie orthographique à la reconnaissance exclusivement orthographique du mot. Cependant, le lecteur est capable d'accéder à d'autres aspects du mot comme la phonologie et la sémantique à travers cette voie. Le fait d'appeler les voies orthographique ou phonologique fait référence seulement à la distinction

---

<sup>4</sup> Les pourcentages indiquant la consistance entre les graphèmes et les phonèmes peuvent se trouver à la base de données MANULEX (Lete, Sprenger-Charolles, & Cole, 2004).

dans la façon de procéder avec les éléments du mot (analyse lexico visuo-orthographique vs analyse de segmentation phonologique).

Enfin, quelques données suggèrent que les deux voies pourraient s'activer simultanément, en parallèle, et que le processus complet de traitement du mot se ferait à travers la voie qui a été capable de traiter l'item le plus rapidement (Binder, Medler, Desai, Conant, & Liebenthal, 2005; Coltheart, Rastle, Perry, Langdon, & Ziegler, 2001). En tout cas, ce qui est essentiel à retenir dans ce modèle est la claire distinction de deux processus de traitement du mot écrit, qu'ils soient simultanés ou non.

#### **A.4.2 Développement de la lecture dans le cadre du modèle de lecture à deux voies**

Le degré d'utilisation des deux voies va varier beaucoup avec le développement de la lecture. Chez l'enfant apprenti-lecteur, la voie phonologique a une importance capitale. En effet, le degré d'utilisation de cette voie chez l'enfant a des effets importants sur son niveau de lecture car elle permet de décoder les premiers mots qui ne sont pas familiers, par l'application des règles de CGP (Perfetti, 1992). Pendant cette période, l'enfant réussira mieux avec les mots réguliers qu'avec les mots irréguliers. Cette différence de performance entre les mots réguliers et les mots irréguliers chez l'apprenti-lecteur, connue sous le nom d'effet de régularité, est caractéristique d'une certaine phase de développement de la lecture (Ehri, 1995; Frith, 1985). Plus tard, lorsque les mots rencontrés seront devenus familiers, l'enfant commencera à utiliser de façon préférentielle l'autre voie, la voie orthographique, qui permet une identification lexicale plus rapide (Ehri, 1995). En effet, l'enfant devient un lecteur expert et la voie phonologique restera comme un mécanisme secondaire d'assistance à la procédure visuo-orthographique (Barron, 1986). Il se produit donc, lors du développement de la lecture, une transition de la hiérarchie d'une voie, la voie phonologique, vers une autre, la voie orthographique (Ehri, 1995; Frith, 1985).



Il apparaît que les enfants en retard de lecture n'achèveraient pas cette transition et garderaient une préférence pour la voie phonologique jusqu'à un âge plus avancé (Waters, Seidenberg, & Bruck, 1984). A l'âge adulte, ces mauvais lecteurs gardent toujours une plus forte tendance à utiliser les mécanismes de la voie phonologique par rapport aux sujets normo-lecteurs (Waters & Seidenberg, 1985). Une des questions que nous pouvons nous poser est de savoir si les sourds adultes qui n'ont pas reçu une stimulation phonologique adéquate, ont un patron analogue à celui des enfants en difficulté, dans l'utilisation des deux voies avec notamment une utilisation plus forte de la voie phonologique. Comme les participants sourds dans nos études appartiennent à ce cas de figure (i.e. ils n'ont pas eu une stimulation phonologique riche), cette question est examinée dans notre travail (analyses 2 et 3).

## **A.5 LECTURE ET NEUROIMAGERIE**

En ce qui concerne l'étude anatomique cérébrale, nous pouvons avoir deux approches. Une première du type topologique qui permet de faire des distinctions en se fondant sur les circonvolutions et scissures et une deuxième sur le plan histologique qui permet de distinguer les structures internes, voire profondes du cerveau. Pour le repérage topologique, sont utilisés des atlas stéréotaxiques comme ceux de Talairach (Talairach & Tournoux, 1988) ou du « *Montreal Neurological Institute* » (Evans, Collins, & Millner, 1992), qui indiquent les coordonnées tridimensionnelles d'un point activé dans le cerveau d'étude, avec une précision de l'ordre du millimètre. Le repérage histologique se base essentiellement sur les travaux de Brodmann réalisés à partir du contenu cellulaire des différentes couches de l'écorce cérébrale (Brodmann, 1909). L'intérêt de cette subdivision histologique reste primordial dans la neuropsychologie cognitive, puisque le regroupement cellulaire permet de faire plus aisément l'hypothèse d'une convergence fonctionnelle entre l'activité des régions cérébrales et l'activité cognitive liée à la tâche étudiée. Cependant, ce travail histologique n'a été réalisé qu'à partir de quelques cerveaux (3 ou 4), ce qui fait que cet outil de localisation reste sujet à caution car les variations interindividuelles ne sont pas négligeables à cette échelle d'observation (Amunts *et al.*, 1999) et le nombre limité de cerveaux n'est pas forcément représentatif de la population générale. Dans notre travail nous faisons référence principalement aux aires topologiques mais aussi aux aires de Brodmann, particulièrement celles situées dans le gyrus frontal inférieur (44 et 45) car leur lésion paraît affecter certains aspects de la parole, comme l'articulation (Buckner, Corbetta, Schatz, Raichle, & Petersen, 1996; Damasio, 1992)

En ce qui concerne l'étude analytique, l'avènement de l'imagerie fonctionnelle est venu compléter l'approche lésionnelle, qui restait jusqu'aux années 80 le moyen le plus utilisé pour tester les modèles neuropsychologiques. Le principe de l'approche anatomoclinique était de mettre en relation les lésions cérébrales et les fonctions cognitives afin de construire des modèles de fonctionnement du cerveau. À présent avec les techniques d'imagerie, nous

pouvons réaliser le couplage d'une activité cognitive avec l'activité fonctionnelle du cerveau chez un sujet tout à fait sain ou encore pathologique mais qui ne présente pas de lésions anatomiques visibles. Nous utilisons dans ce travail la technique d'Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf) basée sur l'aimantation des noyaux d'hydrogène du cerveau et qui mesure le signal BOLD (« Blood Oxygen Level Dependent »), qui est une mesure indirecte de l'activation neuronale (voir (Mazoyer, 2001) pour une revue de la technique IRMf)

### **A.5.1 L'utilisation des données de la Neuroimagerie**

Comment les activations cérébrales obtenues dans une expérience en IRMf peuvent faire avancer notre connaissance sur le fonctionnement cognitif ? Cette question est fondamentale, non seulement dans ce travail de thèse, mais aussi dans la neuropsychologie d'aujourd'hui où l'utilisation de la neuroimagerie fonctionnelle a pris une telle ampleur. Quelques chercheurs mettent en question le fait que les données d'IRMf qui restent très approximatives au niveau de l'activité neuronale, avec une précision spatiale et surtout temporelle assez limitée, puissent intervenir dans la création, la modification et la vérification des modèles cognitifs. Mais, comme dans beaucoup de domaines, il s'agit de connaître les limites de la technique afin de l'appliquer de façon la plus adéquate possible.

Ce que les chercheurs utilisent souvent est la connaissance des activations des différentes régions du cerveau afin de nous informer sur leur implication dans les modèles cognitifs à travers un « raisonnement d'inférence inverse » (Poldrack & Wagner, 2004). En effet, l'activité cérébrale dans une région particulière du cerveau peut être considérée comme le marqueur d'un processus cognitif précis, que l'on suppose engagé dans la tâche étudiée.

Nous pouvons appliquer cette connaissance lorsque nous observons les mêmes régions activées dans de nouvelles tâches qui n'engagent pas forcément les mêmes processus cognitifs que la tâche étudiée initialement. Ceci peut nous aider à mieux décider sur les différentes hypothèses de fonctionnement cognitif proposées autour de la nouvelle tâche et

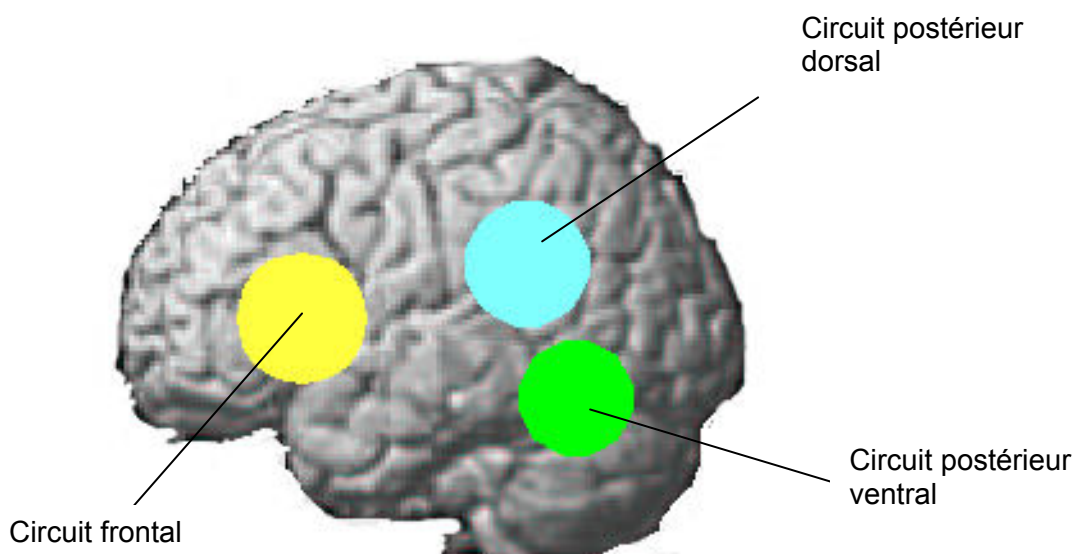
améliorer ainsi l'interprétation sur les modèles théoriques. C'est un « raisonnement d'inférence inverse » que nous emploierons souvent dans notre discussion des données en IRMf.

Mais où peuvent se trouver les limites à l'heure d'interpréter les données de la neuroimagerie fonctionnelle ? Bien que la neuroimagerie fonctionnelle puisse démontrer un lien entre l'activité d'une région ou un réseau cérébral et le processus cognitif mis en œuvre par la tâche, elle ne permet pas de démontrer la nécessité de cette région pour ce traitement. Pour cela, il serait nécessaire d'observer que le dysfonctionnement de cette zone cérébrale s'accompagne systématiquement des déficits dans le traitement cognitif en question. Par conséquent, il est important de souligner qu'une mise en garde est nécessaire lorsque nous faisons un raisonnement d'inférence car nous ne pouvons pas affirmer qu'une région s'activerait seulement pendant un certain traitement cognitif, ce qui nous aiderait à faire de vrais raisonnements logiques et déductifs par la suite (par ex. si et seulement si...). Ce type de raisonnement, malheureusement, est très rarement possible dans le domaine de la littérature de la neuroimagerie. Nous ne devrions pas alors, prendre le raisonnement d'inférence dans sa version réduite afin d'expliquer simplement les activations particulières dans une étude quelconque mais plutôt comme un outil qui peut ouvrir (ou fermer) la porte à d'autres hypothèses, qui seraient alors éventuellement testées dans des expériences ultérieures. Plus particulièrement, l'approche d'inférence peut être utile pour faire le choix entre différents modèles hypothétiques proposés. Dans ce travail, l'analyse de nos données en IRMf nous permet justement de mettre à l'épreuve l'hypothèse de l'utilisation de la voie phonologique chez le sourd (analyse 2).

### **A.5.2 Bases neuroanatomiques de la lecture**

Les techniques d'imagerie cérébrale et électrophysiologiques, ainsi que les études lésionnelles ont permis d'obtenir un aperçu du réseau neuroanatomique de l'identification du mot écrit. Ce réseau paraît être localisé fondamentalement dans trois zones de l'hémisphère gauche : une antérieure et deux postérieures dont une est située dans la partie ventrale et

une autre dans la partie dorsale (voir figure 2) (Binder *et al.*, 1997; Price, 2000; Pugh *et al.*, 2001). Le circuit postérieur ventral se place autour des aires extrastriées (gyrus lingual et partie postérieure du gyrus fusiforme), et de l'aire occipito-temporale inférieure (partie antérieure du gyrus fusiforme et partie postérieure du lobe temporal inférieur) tandis que le circuit dorsal contient le lobe pariétal inférieur (gyrus supramarginal et gyrus angulaire) et la partie postérieure du lobe temporal supérieur et moyen. Enfin, la zone antérieure est placée à l'intérieur du gyrus frontal inférieur (GFI), notamment dans les aires *opercularis* (aire de Broca) et *triangularis*, mais aussi autour du GFI dans les aires préfrontales, l'insula, le gyrus frontal moyen et la partie ventrale du gyrus précentral. Nous pouvons ajouter à ce réseau classique de la lecture d'autres aires qui s'activent souvent dans des tâches de lecture comme le cervelet dans l'hémisphère droit et le cortex retrospenial.



**Figure 2** Modèle du circuit neuronal de la lecture

L'activation du circuit postérieur ventral est liée essentiellement à la représentation orthographique, ce qui a donné lieu à sa dénomination comme l'aire visuelle du mot (AVM) (Cohen *et al.*, 2000; Kronbichler *et al.*, 2004; Vigneau, Jobard, Mazoyer, & Tzourio-Mazoyer, 2005) bien que le concept théorique d'un module consacré au traitement orthographique du mot ait été déjà montré et débattu auparavant (Warrington & Shallice, 1980). Des analyses

plus précises nous montrent que des distinctions fonctionnelles peuvent être faites au sein du circuit ventral et que de façon générale, celles-ci pourraient correspondre à un gradient d'activation postéro-antérieur, ayant une spécialisation pour les mots plus forte dans les parties antérieures tandis que les parties les plus postérieures resteraient actives pour l'identification orthographique en général sans être forcément lexicale (Nobre, Allison, & McCarthy, 1994; Polk *et al.*, 2002).

L'activation du circuit postérieur dorsal, quant à elle, est liée au traitement phonologique. D'une part, le lobe pariétal inférieur s'activerait davantage lors de la réalisation d'une tâche dans laquelle il est nécessaire de faire une conversion graphophonologique (Booth *et al.*, 2002, 2003). Par exemple, une tâche visuelle de rimes nécessite de transformer l'information visuelle sous forme phonologique tandis qu'une tâche auditive orthographique nécessite la transformation de l'information auditivo-phonologique en information visuelle. D'une autre part, la partie postérieure du gyrus temporal supérieur serait impliquée dans l'analyse phonologique du mot écrit (Binder *et al.*, 1997; Price *et al.*, 1994). Cette région est fortement activée pendant la perception auditive et la production orale de la parole (Buchsbaum *et al.*, 2005; Katz *et al.*, 2005; Petersen, Fox, Posner, Mintun, & Raichle, 1988; Poldrack *et al.*, 2001) et, par conséquent, a été proposée comme un relais entre l'information auditive et la production motrice de la parole (Hickok & Poeppel, 2004). Dans la lecture, elle paraît jouer un rôle d'accès aux propriétés phonologiques du mot à travers une analyse acoustique (Fiez & Petersen, 1998). Enfin, le gyrus temporal moyen postérieur serait responsable de la prononciation des mots pendant la lecture à haute voix (Simos, Fletcher, Foorman *et al.*, 2002).

Le circuit frontal possède une distinction fonctionnelle très claire entre la partie antérieure, appelée *pars triangularis*, autour de l'aire de Brodmann (AB) 45, et la partie postérieure, appelée *pars opercularis* ou aire de Broca, autour de l'AB 44. La première est impliquée dans un processus sémantique de maintien et de contrôle de l'information (Bookheimer, 2002; Fiebach, Friederici, Muller, & von Cramon, 2002; Fiez, 1997; McDermott, Petersen,

Watson, & Ojemann, 2003). La deuxième, l'AB 44, est une région qui s'active dans des tâches très variées, linguistiques et non linguistiques, ayant comme rôle commun l'analyse des aspects séquentiels (Heim *et al.*, 2005; Horwitz *et al.*, 2003). Pour la lecture, cette aire serait impliquée dans la prospection de l'information phonologique du mot au niveau séquentiel à travers l'articulation, sous vocalisée ou ouverte, propre au langage ce qui lui confère une importance majeure dans plusieurs fonctions liées à la lecture des mots (Fiez, 1997; Horwitz *et al.*, 2003). En effet, l'articulation du mot serait nécessaire pour le recodage phonétique dans la mémoire de travail ou encore pour l'analyse graphophonologique séquentielle qui sont, comme nous l'avons déjà vu, deux aspects essentiels en relation avec la lecture (cf. A.2). Pour le reste des aires activées autour de l'aire de Broca une précision s'impose, du fait de la confusion engendrée par la dénomination de l'aphasie de Broca. En effet, ce trouble neurologique implique la lésion de l'aire de Broca mais aussi les régions autour de cette aire, comme l'insula, le gyrus frontal moyen ou la partie ventrale du gyrus précentral, qui n'appartiennent plus à l'aire de Broca. Cette aphasie a été classiquement liée aux déficits dans la production de la parole mais elle provoque aussi des problèmes de compréhension syntaxique (Alexander & Schmitt, 1980; Costello & Warrington, 1989). Néanmoins, la lésion isolée de l'aire de Broca ne provoquerait qu'un déficit d'articulation au niveau praxique (Mohr *et al.*, 1978).

### **A.5.3 Neuroanatomie fonctionnelle du modèle de lecture à deux voies**

L'imagerie cérébrale a aussi contribué à mettre à l'épreuve le modèle de lecture à deux voies. Dans cette perspective, des études ont comparé l'activation cérébrale pendant la lecture des différents items lexicaux (par ex. mots réguliers et irréguliers de différents niveaux de fréquence, pseudomots, etc.). La logique établit que si le modèle de lecture à deux voies est correct, ces items seraient traités différemment les uns des autres. Par exemple, Fiebach et collaborateurs (2002) ont réalisé une tâche de décision lexicale en IRMf événementielle dans laquelle le sujet devait distinguer les mots des pseudomots. Par la suite, ils ont fait une soustraction entre l'activation des mots et celle de pseudomots et vice-

versa. Selon le modèle de lecture à deux voies, la reconnaissance des mots seraient plutôt liées à l'identification orthographique alors que les pseudomots devraient être traités à travers la voie phonologique. Les résultats montrent que les mots activent plus que les pseudomots la voie ventrale postérieure autour du gyrus fusiforme et le lobe temporal postérieur tandis que les pseudomots activent plus que les mots le circuit antérieur de la lecture autour du GFI (Fiebach *et al.*, 2002). Ce résultat indique l'existence de contributions fonctionnelles distinctes des différentes régions cérébrales pour l'accès au mot écrit. D'autres études ont trouvé des distinctions fonctionnelles similaires au niveau neuroanatomique, ce qui suggère la validité du modèle à deux voies de la lecture (Ischebeck *et al.*, 2004; McCandliss, Cohen, & Dehaene, 2003; Petersen *et al.*, 1988; Simos, Fletcher, Foorman *et al.*, 2002).

Une méta-analyse de Jobard et collaborateurs en 2003 a essayé de préciser spatialement les régions compatibles avec les deux voies du modèle à partir de 35 études neuroanatomiques de la lecture (voir figure 3 ; p. 41).



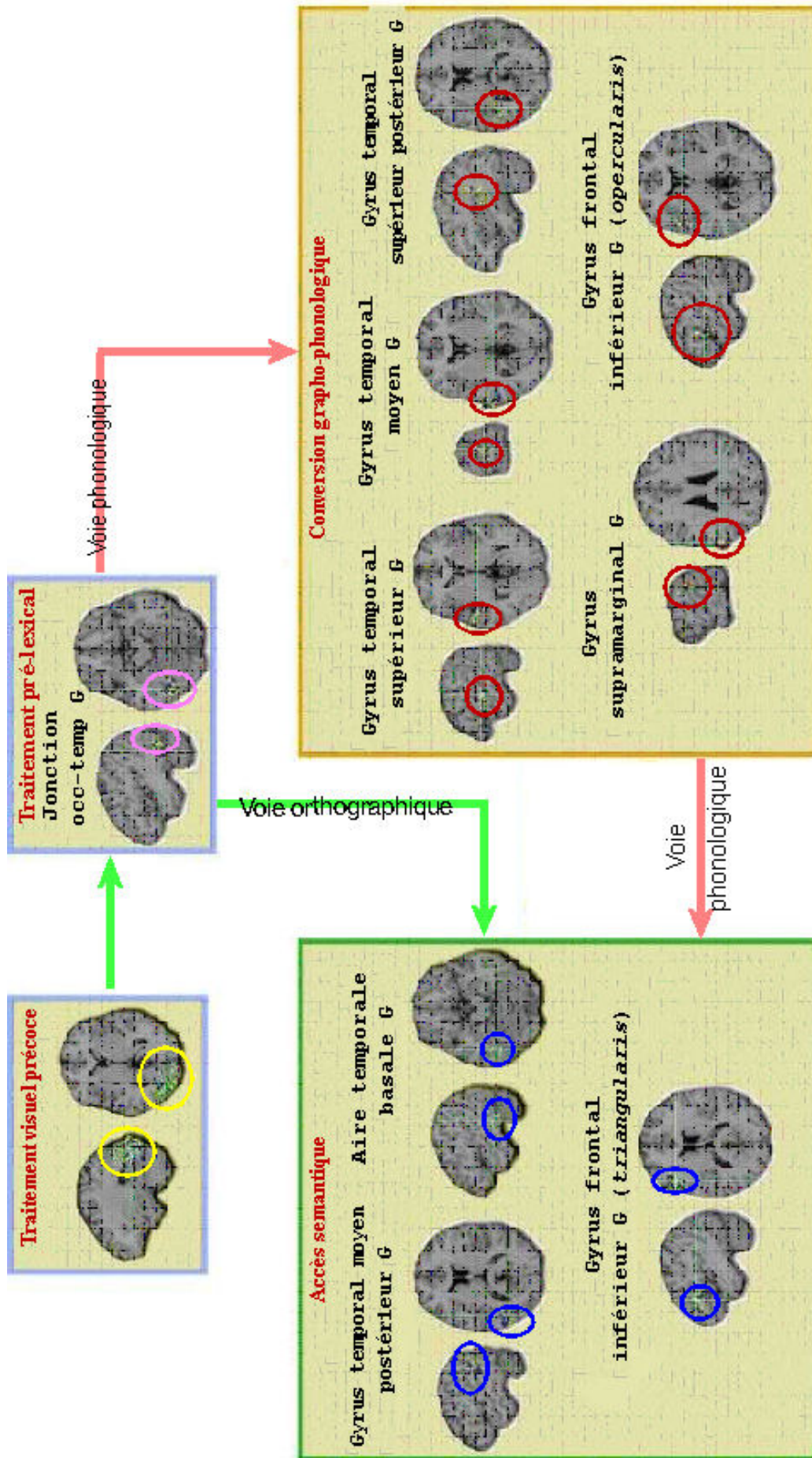


Figure 3 Modèle de lecture à deux voies proposé par Jobard et al. (2003) à partir de 35 études de neuroimagerie

Leur analyse confirmerait essentiellement les trois grandes zones d'activation de la lecture évoquées précédemment (Jobard, Crivello, & Tzourio-Mazoyer, 2003).

Le circuit dorsal postérieur comporterait un groupe de quatre clusters d'activation plus impliqués dans la voie phonologique et un cluster dans la voie directe. Des quatre clusters de la voie phonologique, un cluster serait situé dans le lobe pariétal inférieur (autour du gyrus supramarginal) et trois clusters dans le gyrus temporal : l'un dans le gyrus temporal moyen et deux dans le gyrus temporal supérieur. Parmi ces deux derniers, un cluster serait situé plus postérieurement que l'autre. Le cluster de la voie directe serait placé autour du gyrus temporal moyen postérieur. Comme nous l'avons déjà dit auparavant, l'activation des régions temporales supérieures et moyennes du circuit ventral a été souvent trouvée dans des études du langage oral et avec des contrastes qui mettent en avant le traitement phonologique (Buchsbaum *et al.*, 2005; Katz *et al.*, 2005; Petersen *et al.*, 1988; Poldrack *et al.*, 2001). Cependant, et malgré ce rôle commun, il serait possible de faire une distinction fonctionnelle importante autour de cette région dans le cadre de la lecture et plus particulièrement du modèle de lecture à deux voies. En effet, les trois clusters temporaux qui appartiennent à la voie phonologique, seraient plus liés à la CGP afin de traiter la prononciation des mots (sous vocale ou ouverte) tandis que l'autre cluster, dans la partie postérieure du gyrus temporal moyen, serait engagé dans la voie directe ayant une fonction de relais entre l'identification phonologique et la signification du mot (Howard *et al.*, 1992; Simos, Fletcher, Foorman *et al.*, 2002).

Dans le circuit ventral postérieur, Jobard et collaborateurs (2003) proposent la distinction fonctionnelle entre deux régions. D'une part, la partie la plus postérieure du circuit, au niveau de la jonction occipito-temporale entre le gyrus fusiforme et le lobe temporal inférieur, s'activerait avant que le traitement soit divisé en deux voies fonctionnelles (voir figure 3 ; p. 41). Cette région aurait un rôle fonctionnel pré-lexical car elle s'activerait plus avec des mots mais aussi avec des pseudomots lorsqu'on les compare à des suites de consonnes (Dehaene *et al.*, 2001). Plus précisément, elle pourrait fonctionner comme un premier filtre

qui laisserait passer tous les items similaires aux mots de la langue écrite (Warrington & Shallice, 1980). Toutefois, d'autres études montrent qu'autour de cette aire on retrouve une activation aussi bien pour les dessins d'objets que pour les mots (Moore & Price, 1999; Vandenberghe, Price, Wise, Josephs, & Frackowiak, 1996), ce qui suggère que le filtre serait utilisé pour tout type de stimulus visuel qui pourrait avoir une signification, et non seulement pour les mots. Ces différences de résultats pourraient s'expliquer en partie par le fait que de petites variations dans l'espace stéréotaxique du circuit ventral postérieur qui sont parfois difficiles à détecter dans les données de l'imagerie fonctionnelle, peuvent représenter un changement important dans le rôle fonctionnel. En effet, il se peut que cette variabilité des résultats fonctionnels dans un espace restreint réponde, comme c'est le cas chez le singe (Riesenhuber & Poggio, 1999), à une organisation hiérarchique très fine des aires du circuit ventral (de la région occipitale postérieure jusqu'aux régions temporales antérieures). Dans cet espace limité, la taille des neurones récepteurs s'allonge d'un facteur de deux ou trois et la capacité à traiter des objets de plus en plus complexes (d'une simple ligne à un objet entier) augmente ce qui permet une plus grande spécialisation dans le traitement visuel au fur et à mesure que le nœud d'activation se déplace vers l'avant (Dehaene, Cohen, Sigman, & Vinckier, 2005). Par conséquent, il n'est pas surprenant de retrouver la partie la plus postérieure, déjà mentionnée auparavant, liée à un premier filtre dans l'identification « physique » du mot tandis que la partie antérieure du circuit ventral, située dans le segment postérieur du gyrus temporal inférieur et appelée l'aire temporale basale, serait impliquée dans la récupération, et identification lexicale propre à la modalité visuelle et dans la catégorisation sémantique du mot (Nobre *et al.*, 1994; Price & Friston, 1999; Thompson-Schill, Aguirre, D'Esposito, & Farah, 1999). Cette dernière région participerait donc à l'analyse orthographique, caractéristique de la voie directe (voir figure 3 ; p. 41)

Dans le GFI gauche, deux clusters d'activation ont été identifiés. Le premier correspondrait à la *pars opercularis* du gyrus frontal inférieur, étant impliqué dans le système d'articulation et recodage du mot, il est nécessaire au processus d'analyse de la voie phonologique. Le

deuxième cluster, constitué de la *pars triangularis* du GFI, aurait comme rôle d'intégrer et de comparer les différentes informations sémantiques, et viendrait compléter, dans un travail d'affinement, l'identification sémantique du mot initiée dans le circuit ventral postérieur (Bookheimer, 2002) distinguant l'activation des mots selon leur fonction (par ex. noms ou verbes) ou leur référence au réel (par ex. concret ou abstrait)

#### **A.5.4 Neuroanatomie de la lecture labiale et la voie pariéto-frontale**

Les résultats des études présentées dans la section « phonologie et lecture labiale » (cf. A.3) nous suggèrent que la perception de la parole constitue, chez l'entendant, un patron perceptif intégré de plusieurs modalités perceptives. A la modalité auditive s'ajoute, chez le sujet normal au moins, l'intégration de la modalité visuelle à travers la lecture labiale. Mais comment s'effectue cette intégration ? Les études en neuroanatomie fonctionnelle de la lecture labiale peuvent nous aider à mieux préciser la nature de la lecture labiale et la façon dont elle s'intègre avec la modalité auditive pour la perception de la parole. En premier lieu, la lecture labiale n'active pas les mêmes régions selon que le locuteur émet de la parole ou effectue des gestes qui sont semblables à la parole mais qui manquent de signification (Campbell *et al.*, 2001). Cela suggère que l'implication de la lecture labiale dans la perception de la parole n'est pas liée à une représentation visuelle de surface de mouvement de lèvres mais à ce qui peut être interprété comme de la parole émise.

Ensuite, il existe une série d'études en imagerie cérébrale qui conduisent à un des résultats le plus étonnants concernant la lecture labiale. Calvert *et al.* (1997) ont montré que la lecture labiale seule de la parole (sans accompagnement acoustique) et de la pseudoparole (i.e. mouvements des lèvres qui sont phonologiquement plausibles mais qui ne forment pas des mots) activent le cortex auditif (Calvert *et al.*, 1997). Ce résultat qui a été répliqué en absence de bruit de scanner (MacSweeney *et al.*, 2000) suggère que l'éventuel traitement de la parole est lié, quelque soit la modalité, à l'activation des aires du langage du gyrus temporal, qui étaient généralement considérées comme exclusivement liées à la perception auditive de la parole. En plus, l'influence de la modalité visuelle de la parole sur sa

perception acoustique se produit déjà à un niveau prélexical (i.e. pseudoparole). Néanmoins, le réseau d'activation de la lecture labiale dans les lobes temporaux paraît concerner les aires auditives d'association ou secondaires et épargner le cortex auditif primaire (Bernstein *et al.*, 2002; MacSweeney *et al.*, 2000) ce qui écarte la possibilité d'une identification entre le traitement visuel et auditif de la perception de la parole. En effet, si la lecture labiale avait activé aussi le cortex auditif primaire, alors la question sur les mécanismes qui expliqueraient la perception visuelle de la parole serait en partie résolue : le traitement visuel de la parole serait « injecté » dans le cortex auditif et puis on le traiterai comme si c'était de l'information auditive. Mais, en réalité, la perception visuelle de la parole induit d'abord le traitement de l'information visuelle dans le cortex occipital pour ensuite entamer un traitement phonologique dans les aires associatives ou secondaires du lobe temporal (Calvert & Campbell, 2003). Il est donc vraisemblable d'imaginer un point d'intégration multimodale. Des expériences bimodales (visuelles et auditives) paraissent situer ce lieu d'intégration multimodale autour de la partie postérieure du gyrus temporal supérieur (Sekiyama, Kanno, Miura, & Sugita, 2003), ce qui n'est pas très surprenant, étant donné que cette région est au carrefour des cortex visuel (occipital) et auditif (temporal).

Il a été suggéré que cette intégration multimodale se ferait à partir des propriétés dynamiques de la parole fournies par les différentes modalités (Munhall & Vatikiotis-Bateson, 1998; Yehia, Rubin, & Vatikiotis-Bateson, 1998). Cependant, Calvert et Campbell ont trouvé que cette intégration de traits dynamiques se faisait même lorsque l'information visuelle de la parole était donnée à travers une stimulation statique (visages fixes) (Calvert & Campbell, 2003). Comment cela est-il possible ? Ces auteurs proposent qu'afin de pouvoir récupérer l'information dynamique nécessaire pour l'intégration multimodale et qui est manquante dans la stimulation, la voie pariéto-frontal s'activerait plus dans un traitement « top-down ». Cette voie est souvent activée lorsque le sujet a besoin d'accéder à la représentation des séquences dynamiques qui ne sont plus dans la fenêtre de la stimulation, comme dans le processus de l'imitation (Buccino *et al.*, 2001; Iacoboni *et al.*, 1999). Dans le cas de

l'émission de la parole en condition statique, l'implication de cette voie jouerait un rôle dans un processus de reconstruction interne de l'image dans un format plus naturel et dynamique (Calvert & Campbell, 2003).

Nous discuterons plus tard la possibilité que notre groupe de sourds active la voie fronto-pariétal pendant la réalisation de la tâche de jugement visuel de rimes (cf. C.3).

## **A.6 LE SOURD ET LA LECTURE**

Dans la plupart des enfants sourds le niveau de lecture est inférieur à l'entendant du même âge (Conrad, 1979; Marschark & Harris, 1995). Ce retard de lecture du sourd est à l'origine des études qui tentent d'en identifier les possibles causes. Certaines études ont proposé que la cause des mauvaises performances du lecteur sourd serait liée aux déficits linguistiques comme le vocabulaire (Walter, 1978), les habiletés syntaxiques (Quigley, 1982), la sémantique (Kintsch, 1988) ou encore la structure du discours (Van Dijk & Kintsch, 1983) mais la plupart des études ont suggéré que la raison principale des problèmes de lecture serait une difficulté chez le sujet sourd pour établir des relations entre le langage parlé et les mots écrits à travers les codes phonologiques de la langue orale (voir (Musselman, 2000; Perfetti & Sandak, 2000) pour des revues). Dans cette perspective, quelques études ont essayé de discerner sur l'existence ou l'absence d'un code phonologique chez le sourd. Ceci est une question centrale car l'absence du codage phonologique dans certaines tâches pourrait indiquer la possibilité que le sourd a une approche particulière de la lecture, tout au moins qualitativement différente de celui de l'entendant. Comme nous le verrons par la suite, les résultats n'ont pas toujours été convergents et nous retrouvons des résultats aussi bien en faveur qu'à l'encontre d'un usage de la phonologie chez le sourd.

### **A.6.1 Les sourds, utilisent-ils la phonologie ?**

#### **A.6.1.1 En faveur de l'existence d'un traitement phonologique chez le sourd**

Nous distinguons ici les tâches qui font une demande explicite de traitement phonologique, comme le jugement de rimes et les tâches qui ne demandent pas cette utilisation de la phonologie de façon explicite mais que le sujet peut l'utiliser pour accomplir la tâche, comme c'est le cas des tâches d'orthographe ou de la décision lexicale. Cette distinction nous permet de différencier le lecteur sourd qui accède à la phonologie de manière automatique du lecteur sourd qui accède à la phonologie de façon contrôlée, particulièrement lorsque la

tâche l'exige. Cette idée sera importante lorsque nous discuterons plus tard de la possibilité que le sourd accède à la phonologie des mots à travers un processus contrôlé (cf. C.1).

#### **A.6.1.1.1 Mesures implicites de la phonologie**

La preuve la plus intéressante d'un accès à la phonologie chez le sourd nous est fournie par quelques études utilisant des tâches dans lesquelles le recours à la phonologie n'est pas explicitement demandé. Par exemple, Conrad (1979) a proposé une tâche de rappel à une grande population d'enfants sourds<sup>5</sup>. Il a demandé aux enfants d'encoder deux groupes de mots. Un groupe contenait des mots qui rimaient entre eux tandis que dans l'autre groupe, les mots avaient des relations visuelles entre eux. Si les mots ont été encodés à travers l'usage de la phonologie, l'enfant serait plus perturbé lors du rappel des mots qui présentent des similarités phonologiques. En revanche, si l'encodage des mots est visuel, cela devrait provoquer plus de perturbations avec les mots orthographiquement similaires. Les résultats ont montré que les enfants sourds avaient un moindre rappel avec les mots qui rimaient qu'avec les mots ayant des liens visuels (Conrad, 1979). Des études similaires ont montré aussi chez le sourd une influence des aspects phonologiques dans leurs performances de mémoire (Dodd & Hermelin, 1977; Hanson, 1982), ce qui suggère que la phonologie a été utilisée pour encoder les mots. Par exemple, Dodd et Hermerlin (1977) ont proposé une tâche de mémoire dans laquelle le sujet dans un premier temps essayait de mémoriser une liste de 18 paires de mots dont la moitié étaient homophones. Ensuite, 18 mots étaient présentés au sujet, un par paire, et il lui était demandé de rappeler le deuxième mot de la paire. Les résultats montrent que le sourd est plus performant lorsqu'il doit apparier les paires de mots homophones que les paires dont le lien n'est pas phonologique. De plus les paires étaient construites de sorte que les mots avaient une similarité orthographique équivalente dans les deux groupes de paires (Dodd & Hermelin, 1977). Ce résultat suggère que la meilleure performance par les paires homophones ne serait pas due à une influence de l'orthographe mais fondamentalement à celle de la phonologie.

---

<sup>5</sup> Pratiquement tous les enfants sourds d'Angleterre et du Pays de Galles



Une autre tâche qui ne recourt pas explicitement à la phonologie est la tâche de décision lexicale, dans laquelle le sujet doit discriminer entre mots et pseudomots. Hanson et Fowler ont utilisé une tâche de décision lexicale un peu particulière<sup>6</sup> dans laquelle le sujet devait répondre oui, si et seulement si les deux items présentés étaient des mots (Hanson & Fowler, 1987). Le point intéressant de cette expérience provient de l'analyse d'un sous groupe de paires de mots orthographiquement similaires. Dans ce sous groupe, seulement la moitié de ces paires avaient un lien phonologique. Les résultats montrent que les sourds, comme les entendants, avaient un temps de réponse plus court lorsque la décision portait sur les mots qui avaient le lien phonologique qu'avec les mots qui ne l'avaient pas. Ce résultat suggère que le sourd, comme l'entendant, a accès à la phonologie. Cette tâche est intéressante parce qu'elle montre la présence d'un accès à la phonologie chez le sourd dans une tâche où la réponse doit être relativement rapide. Toutefois, les sujets sourds qui faisaient partie de cette expérience étaient parmi ceux qui avaient reçu une meilleure éducation et qui par conséquent, avaient atteint un bon niveau de lecture.

Des effets phonologiques ont été trouvés aussi dans des tâches d'orthographe (Hanson, Shankweiler, & Fischer, 1983; Leybaert & Alegria, 1995) dans lesquelles la demande de traitement phonologie n'est pas non plus explicite. Par exemple, Leybaert *et* Alegria (1995) ont examiné les mots en fonction de leur transparence orthographique. En effet, quelques mots « réguliers » n'ont qu'une seule combinaison possible à partir de leur son (par ex. fleur) tandis que d'autres mots dits « opaques » contiennent des phonèmes qui peuvent s'écrire de différentes façons (par ex. le phonème /R/ de train peut s'écrire 'ain', 'ein', 'yn' ou 'in'). Si le sujet fait usage du codage phonologique, il devrait avoir moins d'erreurs pour les mots réguliers que pour les mots opaques, ce qui se traduirait par la présence d'un effet de régularité. Pour évaluer cela, les auteurs ont utilisé une tâche de complétion de phrases en français et ils ont trouvé chez l'enfant sourd autour de 10 ans, moins d'erreurs dans les mots

---

<sup>6</sup> Généralement, la tâche de décision lexicale consiste à décider de la lexicalité des items, présentés un par un. Dans cette tâche créée par Meyer *et al.* (1974), la seule différence est que les sujets doivent juger de la lexicalité de deux items présentés simultanément (Meyer, Schvaneveldt, & Ruddy, 1974)

réguliers que dans les mots opaques. Cet écart entre les mots réguliers et opaques était plus petit par rapport à ce qui était observé chez l'enfant entendant. Toutefois, la différence entre les deux groupes (entendants et sourds) disparaissait à l'âge de 13 ans (Leybaert & Alegria, 1995).

#### **A.6.1.1.2 Mesures explicites de la phonologie**

D'autres études ont montré l'accès du lecteur sourd à la phonologie au moyen de tâches où l'utilisation de la phonologie est demandée explicitement. Ce type de tâches peut nous montrer si le sourd est capable d'utiliser la phonologie dans certains contextes, même s'il ne l'utilise pas systématiquement. Par exemple, Hanson et Fowler (1987) ont demandé à deux groupes de sujets sourds et entendants de niveau universitaire, de faire un jugement visuel de rimes forcé entre paires de mots orthographiquement similaires qui riment (par ex. « wave-save »), ou ne riment pas (par ex. « have-cave »). Cette tâche empêche le sourd de se baser sur l'orthographe des mots pour répondre et par conséquent, il est obligé d'utiliser la phonologie s'il veut accomplir la tâche correctement. Les résultats montrent que les sourds sont capables d'utiliser l'information phonologique des mots car leurs scores sont au dessus du hasard (64%) bien qu'ils restent inférieurs à ceux de l'entendant (99,6%) (Hanson & Fowler, 1987).

Un deuxième exemple est celui de Campbell et Wright (1988) qui ont utilisé une tâche de jugement visuel de rimes avec des paires de mots et de dessins. Les dessins avaient pour but d'enlever toute composante orthographique de la stimulation visuelle. Dans cette tâche quatre types de paires ont été utilisés :

1. paires qui riment et ont une orthographe similaire, et que nous pouvons appeler rime homographe (par ex. « sun-gun » /sHn/-/gHn/)
2. paires qui ne riment pas et n'ont pas une orthographe similaire, et que nous pouvons appeler non-rime non-homographe (par ex. « bike-book » /baNk/-/buk/)

3. paires qui riment et n'ont pas une orthographe similaire, et que nous pouvons appeler rime non-homographe (par ex. « plane-train » /pleNn/-/treNn/)
4. paires qui ne riment pas et ont une orthographe similaire, et que nous pouvons appeler non-rime homographe (par ex. « bone-one » /bBun/-/wHn/)

Les deux premiers types de paires ont été dénommés consistantes car l'orthographe et la phonologie sont congruentes. En revanche, les deux derniers types de paires sont des paires inconsistantes car l'orthographe et la phonologie des mots sont incongruentes. Les résultats montrent, comme dans l'expérience précédente de Hanson et Fowler (1987), que les performances du lecteur sourd restent globalement au dessus du hasard, ce qui suggère une utilisation des informations phonologiques du mot (Campbell & Wright, 1988). Les auteurs ont observé aussi que la performance chez les sourds était beaucoup plus faible pour les paires inconsistantes que pour les paires consistantes (i.e. effet de consistance ou congruence). Cet effet de consistance était beaucoup plus marqué chez les sourds que chez les entendants. Les auteurs ont conclu que le sujet sourd, malgré la possibilité d'accès à la phonologie, aurait tendance à s'appuyer plus que l'entendant sur la forme orthographique pour résoudre la tâche de jugement visuel de rimes, ce qui expliquerait le niveau élevé d'erreurs dans les conditions inconsistantes. Enfin, il est intéressant de signaler que l'effet de congruence avec les dessins est comparable à celui observé pour les mots écrits, ce qui suggère que le sourd n'utilise pas une idée de la rime particulier pour les dessins mais qu'il aurait plutôt recours à la représentation du mot écrit pour prendre une décision.

Une autre étude explicite de la rime consiste à utiliser la génération de rimes dans laquelle le sujet doit générer des rimes à partir d'un mot. Hanson et McGarr (1989) ont montré dans cette tâche que 30 % de réponses correctes produites par les sourds étaient différentes orthographiquement (blue-few), ce qui indiquerait encore l'utilisation de la phonologie par le sourd (Hanson & McGarr, 1989).

*Ces études montrent que le sourd peut faire usage de la phonologie. Toutefois la plupart de ces études phonologiques relèvent aussi de plus faibles scores pour les sourds que pour les entendants. Il a été suggéré que cette différence existe parce que le sourd a une plus grande tendance à faire une analyse orthographique que l'entendant. Par exemple, dans les conditions inconsistantes de la tâche de jugement visuel de rimes proposée par Campbell et Wright (1988), les auteurs proposent que le sourd serait guidé par la similitude orthographique concernant la fin des mots, ce qui provoquerait un nombre élevé d'erreurs. Mais il est possible que les sourds commettent ces erreurs parce qu'ils font un usage erroné du traitement phonologique. Nous examinerons cette hypothèse à travers l'analyse des erreurs commises dans une tâche de jugement visuel de rimes. (Hypothèse n° 1 – analyse n° 1)*

#### **A.6.1.2 Contre l'usage de la phonologie chez le sourd**

Les études qui plaident contre l'usage de la phonologie chez le sourd proviennent des tâches où la phonologie n'est pas mesurée explicitement. Plus précisément, les résultats les plus importants proviennent des expériences en orthographe et décision lexicale chez l'enfant. La logique est souvent la même pour les deux tâches et elle se base sur la différence de scores entre les mots réguliers et les mots irréguliers. Par exemple, dans la tâche de décision lexicale, une différence de performance entre les mots réguliers et irréguliers chez l'enfant serait compatible avec la présence de la phonologie. En effet, les enfants qui apprennent à lire s'appuient habituellement plus sur la voie phonologique afin de pouvoir décoder les mots au moyen des règles de conversion graphème-phonème, avant de devenir expert et pouvoir accéder directement, sans décodage, aux mots, notamment à ceux qui ne suivent pas ces règles (par ex. mots irréguliers) (voir section A.4.2). Par conséquent, dans une première période chez l'enfant, il est habituel de trouver une meilleure performance pour les mots réguliers que pour les mots irréguliers. Cependant, plusieurs expériences chez les enfants sourds ne trouvent pas cet effet, appelé de régularité, ce qui pourrait signifier l'absence de phonologie (Aaron, Keetay, Boyd, Palmatier, & Wacks, 1998; Beech & Harris,

1997; Harris & Beech, 1998; Harris & Moreno, 2004; Merrils, Underwood, & Wood, 1994; Waters & Doehring, 1990) (voir (Perfetti & Sandak, 2000) pour une revue). Toutefois, quelques résultats méritent d'être nuancés.

#### **A.6.1.2.1 *Tâches de décision lexicale***

Une expérience intéressante à ce sujet est celle de Merrils *et al.* (1994). Ces auteurs ont évalué l'effet de régularité dans une tâche de décision lexicale chez un groupe d'enfants sourds et trois groupes d'enfants entendants : deux groupes du même âge que les sourds mais avec des niveaux de lecture différents (bons et mauvais lecteurs ; ce dernier groupe avec un niveau de lecture similaire aux sourds) et un autre groupe, plus jeune, avec le même niveau de lecture que les sourds. Les sourds ne montrent pas d'effet de régularité au niveau de la performance et les auteurs indiquent que les sourds utiliseraient pour reconnaître le mot des mécanismes visuels propres à la voie directe, plutôt que la voie phonologique (Merrils *et al.*, 1994). Toutefois, parmi les entendants, seuls les jeunes montreraient un effet de régularité. En effet, les deux autres groupes d'entendants (qui avaient le même âge que les sourds) avaient un résultat comparable au groupe de sourds. L'un de ces deux groupes avait aussi un niveau semblable de lecture, ce qui suggère que son comportement, en ce qui concerne l'effet de la régularité, ne diffère pas des enfants sourds. Un autre résultat intéressant est que les sourds paraissent avoir un effet de régularité inversé sur le temps de réponse (Expérience 2) : ils mettaient plus de temps pour répondre aux mots réguliers qu'aux mots irréguliers. Ce résultat apparaît avec les mots de haute et de basse fréquence. Les auteurs suggèrent que la facilité du sourd pour discriminer les mots irréguliers se produirait parce que le sourd aurait une plus grande habilité à utiliser la voie orthographique. En effet, ces mots irréguliers possèdent des patrons orthographiques inhabituels et le sourd aurait donc une plus grande aisance à les discriminer par rapport aux mots réguliers (Merrils *et al.*, 1994). Toutefois, les données montrent aussi que cet effet inversé s'accompagne d'une meilleure performance pour les mots irréguliers de haute fréquence que pour les mots irréguliers de basse fréquence. Si la plus grande facilité des sourds pour la discrimination

des mots irréguliers est due à l'identification des patrons orthographiques inhabituels, cette stratégie devrait donner des résultats similaires pour les mots de haute fréquence et basse fréquence ou encore de meilleurs résultats pour les mots de basse fréquence, qui eux disposeraient des patrons orthographiques encore moins habituels pour le lecteur que ceux de haute fréquence.

Beech et Harris (1997) ont fait une tâche de décision lexicale avec des mots et des pseudomots homophones. Ces derniers items ont le même patron phonologique qu'un mot bien qu'ils ne respectent pas le patron orthographique lexical (par ex. en anglais « mesure » qui se prononce comme « measure » ; /meʃBr/). Les résultats ont montré que les enfants entendants commettaient plus d'erreurs lorsqu'il s'agissait d'écarter ces pseudomots que les sourds, ce qui suggère une plus grande utilisation du codage phonologique de la part de l'entendant et éventuellement une analyse plus basée sur le patron orthographique chez le sourd (Beech & Harris, 1997). Toutefois, lorsque nous comparons la performance entre les mots et les non mots homophones, nous constatons que le groupe de sourds a commis plus d'erreurs pour les non mots homophones que pour les mots (nous ne savons pas si la différence était significative car le calcul n'a pas été fait par les auteurs), ce qui pourrait être aussi un signe de codage phonologique chez le sourd bien que moindre que l'entendant.

#### **A.6.1.2.2 Tâches d'orthographe**

Les tâches d'orthographe (ou d'épellation) qui se font habituellement à partir de dessins ont montré généralement une absence de phonologie chez le sujet sourd. Ces études s'intéressent à l'analyse des erreurs des sujets et essaient de les catégoriser comme des erreurs phonologiques ou non-phonologiques. Aaron *et al.* (1998) ont observé que les enfants sourds commettaient moins d'erreurs de type phonologique que les entendants (Aaron *et al.*, 1998). Les mêmes auteurs ont proposé d'épeler des mots dans lesquels il y avait des lettres muettes (« tabac ») et ils ont observé qu'il y avait moins d'erreurs d'omission des lettres muettes chez les sourds que chez les entendants. Ceci suggère que le sourd pourrait accéder à l'orthographe sans passer par la phonologie. Cette étude réplique les

résultats d'autres études (Bellugi, Tzeng, Klima, & Fok, 1989; Dodd, 1980). Toutefois, comme le suggère Perfetti, l'analyse d'erreur dans la tâche d'orthographe ne permet pas véritablement de discriminer une erreur phonologique d'une erreur visuelle (particulièrement en anglais, langue dans laquelle la plupart des études ont été réalisées) Par exemple, si le mot « blue » (/blu:/) en anglais est écrit comme bleu, nous pouvons l'interpréter comme une simple erreur visuelle mais aussi comme un problème de transcription du phonème /u/. De plus, il peut y avoir un problème de deuxième niveau dans l'analyse séquentielle concernant l'écriture de lettres ou encore dans la vérification, après avoir fait l'analyse phonologique (Perfetti & Sandak, 2000)

### **A.6.1.3 Codage phonologique ou non chez le sourd ? A la recherche d'une explication**

Nous avons montré jusqu'ici comment quelques études montrent un accès à la phonologie de la part du sourd tandis que d'autres suggèrent l'inverse. D'après les résultats des différentes recherches mentionnées auparavant, il semble que cette variabilité se produit en fonction de la demande de la tâche. Un des effets les plus paradigmatiques de cette variabilité des résultats selon les tâches est trouvé dans une large étude réalisée par Waters et Doehring (1990). Ces auteurs ont évalué la phonologie du sourd à travers différentes tâches et cela avec des résultats qui semblent, à première vue, divergents. Premièrement, ils ont proposé une tâche de décision lexicale à un groupe de jeunes sourds (7 à 20 ans)<sup>7</sup>. Les résultats montrent que les sourds n'ont pas un effet de régularité, ce qui suggère pour les auteurs que le sourd n'utilise pas la phonologie dans la lecture de mots (Waters et Doehring, 1990 ; p. 350). Toutefois, dans la même étude et avec les mêmes sujets sourds, trois tâches de mémoire montrent bien l'implication de la phonologie car il existe dans les trois cas, une différence de performance de rappel entre les mots que le sujet peut coder ou lier phonologiquement et des mots qui n'ont pas de relation phonologique. Ces résultats dans les tâches de mémoire ont conduit les auteurs à suggérer que les lecteurs sourds feraient

---

<sup>7</sup> Dans cette étude il n'y avait pas de groupe contrôle d'entendants, ce qui ne permet pas de faire des comparaisons.

usage du codage phonologique (Waters et Doehring, 1990 ; p. 358). Pour conclure, et afin de donner une cohérence à ces résultats divergents (pas d'usage de la phonologie dans la décision lexicale et usage de la phonologie dans les tâches de mémoire), les auteurs suggèrent que les sujets sourds utilisent la voie directe pour accéder à la phonologie du mot. En effet, le traitement à travers la voie directe permet, d'une part d'accéder de façon indistincte aux mots réguliers et irréguliers (pas d'effet de régularité) comme le montre la décision lexicale et, d'autre part, d'accéder à la phonologie du mot comme cela est manifesté dans les tâches de mémoire phonologique. Mais en même temps, cette proposition signifierait que les sujets sourds ont été capables de développer une lecture du mot à travers la voie directe (et par conséquent plutôt rapide) sans passer par une maîtrise de la conversion graphophonologique. Ce point de vue va à l'encontre du patron développemental observé dans de nombreuses études chez l'entendant (revues dans (Ehri, 1995; Frost, 1998; Gombert, 1990) ; cf. A.4.2 ) et de fait suggère que les sourds utilisent des mécanismes de traitement des mots écrits réellement différents de ceux des entendants. Effectivement, l'utilisation, chez l'entendant, de la voie orthographique pour accéder à la phonologie est un signe d'expertise et de compétence du sujet lecteur, ce qui n'est pas du tout le cas chez le sourd. Une autre possibilité pour expliquer ces résultats, et qui nous sert de base pour formuler notre hypothèse, serait que les sourds utilisent de façon préférentielle la voie phonologique. Ceci expliquerait, d'une part, l'accès à la phonologie du mot et, d'autre part, les faibles performances par rapport à l'entendant car quelques mots (i.e. irréguliers) ne sauraient pas être correctement traités à travers cette voie.

*Nous mettrons à l'épreuve l'hypothèse d'une utilisation préférentielle de la voie phonologique de la part du sourd dans la deuxième étude, avec l'analyse des données en IRMf pendant la réalisation d'une tâche phonologique explicite (le jugement visuel de rimes) et une autre implicite (la décision lexicale). Si le lecteur sourd utilise plus la voie phonologique, les aires réputées liées à la voie phonologique dans le réseau fonctionnel de la lecture devraient*



*s'activer plus que chez l'entendant. En revanche, si l'hypothèse d'une préférence dans le traitement du mot à travers la voie directe est vraie, le sourd devrait activer plus que l'entendant les régions du réseau liées au traitement de la voie directe. (Hypothèse n° 2 – analyse n° 2)*

Une forte utilisation de la voie phonologique est suggérée aussi à partir des données comportementales des sujets entendants en difficulté de lecture (Waters & Seidenberg, 1985; Waters *et al.*, 1984), ce qui est cohérent avec le patron développemental des deux voies de lecture où l'utilisation préférentielle de la voie orthographique ou directe est liée à la compétence et l'expertise en lecture (Ehri, 1995).

Lorsque nous évoquons les sujets entendants en difficulté de lecture, nous faisons référence souvent aux sujets dont le trouble entre dans la définition de la dyslexie développementale (bien que tous les lecteurs ayant des troubles de lecture ne soient pas tous dyslexiques). Selon le manuel statistique et diagnostique des troubles mentaux (DSM) et la classification internationale de troubles mentaux et comportementaux, la dyslexie développementale est caractérisée par un échec dans l'acquisition efficiente des habiletés de lecture malgré une intelligence normale du sujet, un contexte socioculturel favorable et un enseignement conventionnel (APA, 1994; WHO, 1993). En outre, la dyslexie paraît avoir une origine génétique (Bakwin, 1973; DeFries, Singer, Foch, & Lewriter, 1978). Dans le même temps, des études au niveau neuronal ont montré la présence d'ectopies qui se produisent pendant la migration neuronale (Galaburda, Sherman, Rosen, Aboitiz, & Geschwind, 1985) ainsi qu'une réduction dans la taille des neurones magnocellulaires (Livingstone, Rosen, Drislane, & Galaburda, 1991) et des anomalies anatomiques, comme le manque d'asymétrie du planum temporale (Habib, 2000; Rumsey, Donohue *et al.*, 1997). Il est clair que le sourd n'entre pas dans les critères de la dyslexie car il n'a pas eu une instruction adéquate du fait d'une sous-stimulation linguistique. En fait, l'enseignement précoce du LPC chez le sourd produit une amélioration très importante (cf. A.3.2) De plus, aucune anomalie structurale au niveau de la matière grise dans le cerveau (même au niveau du Gyrus de Heschl) n'a été trouvée chez le sourd (Emmorey, Allen, Bruss, Schenker, & Damasio, 2003). Tous ces facteurs qui sont liés à l'origine des déficits linguistiques

distinguent nettement le sourd du dyslexique<sup>8</sup>. Toutefois, ce qui nous intéresse dans la comparaison entre les sujets entendants mauvais lecteurs et les sourds, est la possibilité d'une ressemblance entre les deux groupes au niveau du trouble phonologique. En fait, chez les entendants, il a été montré que les différents profils de lecteur en difficulté (dyslexiques ou non) auraient tous comme point commun le trouble phonologique (Fletcher, Shaywitz, & Shankweiler, 1994). Nous ne faisons ici que proposer l'élargissement de ce groupe afin d'inclure le sourd.

Le sourd pourrait présenter, comme le sujet entendant en difficulté de lecture, un patron développemental retardé par rapport au sujet normo-lecteur mais qui ne serait pas qualitativement différent. Burden et Campbell (1994) ont suggéré cette idée à partir des résultats obtenus dans une étude comportementale réalisé avec un groupe de jeunes sourds (moyenne d'âge chronologique, 14;6 ans et une moyenne d'âge de lecture, de 10;1 ans) et deux groupes d'entendants, l'un apparié au niveau de l'âge chronologique et l'autre, plus jeune (moyenne d'âge : 10.4 ans) apparié au niveau de l'âge de lecture. Ces auteurs ont réalisé premièrement une tâche de décision lexicale avec non seulement des mots réguliers et irréguliers mais aussi avec un troisième type de mot que nous pouvons dénommer étranges. Ce type de mot possède un patron orthographique et phonologique très particulier (par ex. « yacht » en anglais) alors que les mots irréguliers n'ont qu'un patron phonologique ambigu qui ne s'ajuste pas aux règles graphophonologiques, mais conservent un patron orthographique habituel. La raison de l'inclusion de ce type de mots était de vérifier si les sujets sourds avaient une meilleure performance pour ces mots étranges que pour les mots réguliers et irréguliers afin d'évaluer un éventuel « effet d'orthographe ». En effet, comme il a été déjà évoqué dans le travail de Merrills *et al.* (1994), si la reconnaissance du mot se fait à travers une analyse visuo-orthographique, ces mots seraient plus faciles à discriminer du fait de leur patron orthographique inhabituel. Les résultats montrent effectivement, que les sourds ont un effet orthographique et pas d'effet de régularité donnant des résultats

---

<sup>8</sup> Il est intéressant de signaler que, chez le sourd, il existe aussi des sujets dyslexiques. En effet, il a été montré qu'une sous population de sourds, autour de 8-11 % (Schildroth & Hotto, 1996), aurait des troubles dyslexiques (notamment des déficits magnocellulaires) qui les distinguent bien du reste des lecteurs sourds indépendamment de leurs problèmes en lecture (Samar, Parasnis, & Berent, 2002).

analogues à ceux des entendants du même âge, ce qui suggère que les sourds possèdent un bon niveau de lecture de mots (Burden & Campbell, 1994). Toutefois, dans la même étude et avec les mêmes sujets, les auteurs réalisent une tâche d'orthographe et trouvent cette fois-ci une performance intermédiaire du sourd entre les deux groupes d'entendants. Burden et Campbell (1994) précisent que cet ensemble de résultats chez le sourd (bons lecteurs de mots mais mauvais en orthographe : « *good readers-poor spellers* ») provenant des deux tâches est retrouvé chez les sujets entendants avec un déficit phonologique modéré et reflète une difficulté dans la transition d'une stratégie alphabétique vers une autre orthographique. D'une manière importante, ce patron de performance a été observé aussi bien chez des enfants (Bruck & Waters, 1988) que chez des adultes (Burden, 1992). Par conséquent, les auteurs suggèrent que le sourd, similairement à l'entendant « bon lecteur-mauvais en orthographe », posséderait un développement concernant la maîtrise du mot écrit, qui est enrayé, plutôt que retardé ou prolongé (Burden & Campbell, 1994). Hayes et Arnold (1992) ont également examiné, avec des tests de lecture différents chez des enfants sourds et entendants, si les sourds avaient un patron de développement de la lecture similaire ou différent des entendants. L'analyse des réponses de ces tests soutient l'idée de Burden et Campbell (1994) car elle montre que les faibles scores de lecture chez le sourd relèvent sûrement d'une déviance dans certains aspects par rapport à l'entendant, mais qu'ils ne seraient pas en tout cas représentatifs d'un profil qualitativement différent (Hayes & Arnold, 1992). Ces résultats suggèrent que le sujet sourd pourrait se comporter comme un sujet entendant en difficulté de lecture dont le développement est déviant et non comme un sujet qui aurait un modèle de fonctionnement particulier.

*Plusieurs études en IRMf ont montré que les lecteurs entendants en difficulté ont une activation cérébrale reflétant une moindre latéralisation hémisphérique par rapport aux normo-lecteurs, lorsqu'ils exécutent des tâches qui impliquent un traitement phonologique (Pugh et al., 2000; S. E. Shaywitz et al., 1998). Nous examinerons à partir des données en*

*IRMf de nos deux tâches si l'activation cérébrale du groupe de sourds est aussi moins latéralisée que celle du groupe d'entendants (Hypothèse n° 3 – analyse n° 2)*

Nous venons de l'évoquer : les sujets entendants en difficulté de lecture font plus appel au traitement du mot écrit par la voie phonologique. Paradoxalement, ils ont aussi plus de difficultés à utiliser les règles de conversion graphophonologique, typiques de cette voie, ce qui se manifeste par un moins grand nombre de régularisations associé aux erreurs d'orthographe, ou par un temps de réponse supérieur lors de la lecture des pseudomots ou de mots de basse fréquence (ces mots font plus appel à la voie phonologique) (Backman, Bruck, Hebert, & Seidenberg, 1984)

*Dans une troisième étude nous analyserons le temps de réponse de la tâche de décision lexicale afin d'évaluer si le sourd a, en effet, une difficulté dans l'utilisation de la voie phonologique comme l'entendant mauvais lecteur. (Hypothèse n° 4 – analyse n° 3)*

### **A.6.2 La période sensible pour l'apprentissage de la langue**

Il est logique de penser que la difficulté de la plupart des sourds, dans l'utilisation des ressources phonologiques provient particulièrement de la mauvaise qualité et/ou de la faible quantité de représentations phonologiques acquises par le sourd. En effet, la stimulation limitée au niveau de la langue orale de nombreux sujets sourds serait la cause des déficits phonologiques. Toutefois, plusieurs études chez le sourd, notamment avec le LPC, montrent que ni la quantité, ni la qualité de la stimulation phonologique ne sont suffisantes pour acquérir un bon niveau en ce qui concerne la phonologie du mot écrit. Il est nécessaire aussi que cet apprentissage se fasse précocement (Leybaert, 1998). En effet, les enfants sourds éduqués avec le LPC (cf. A.3.2) n'obtiennent des performances comparables aux entendants que s'ils y ont été exposés précocement tandis que les enfants exposés

tardivement au LPC (par ex. à l'école) ont des performances en lecture et des capacités phonologiques qui restent inférieures à celles des entendants (Charlier & Leybaert, 2000; Leybaert, 2000). Par conséquent, un facteur nécessaire à l'acquisition de bonnes capacités phonologiques est la précocité de l'expérience linguistique. Cette condition est généralisable à l'ensemble du développement linguistique (Locke, 1997). Plus précisément, il semble exister une période critique durant laquelle l'enfant doit être suffisamment stimulé pour acquérir les compétences adéquates dans les différents domaines linguistiques. La période critique pour le développement de la morphologie, de la syntaxe et de la phonologie de la langue se centre autour de 20-37 mois de vie (voir Locke, 1997, tableau 1 et pages 273-280). Mais l'importance d'une période critique pour l'acquisition d'une langue ne se réduit pas à l'effet que cela peut avoir sur une première langue qui a été tardivement stimulée, mais aussi sur l'apprentissage ultérieur d'autres langues (i.e. langues secondes). En effet, ce que l'enfant acquiert dans la période critique serait l'activation adéquate d'un mécanisme analytique modulaire qui rend possible le développement des ressources syntaxiques, morphologiques et phonologiques d'une langue (Locke, 1997 ; p. 266). La période critique de stimulation va donc influencer toute la capacité d'apprentissage des mécanismes linguistiques, ce qui peut expliquer une bonne partie de la variabilité des performances de lecture chez le sourd.

### **A.6.3 L'importance de la langue des signes pour l'acquisition de la langue orale**

Beech et Harris (1997) à la suite d'une étude sur la phonologie, observèrent de manière fortuite que dans un groupe de 36 sourds, les 4 enfants éduqués en langue des signes par des parents sourds « signeurs » étaient parmi les meilleurs en performances de lecture. Plus encore, la meilleure performance du groupe de sourds provenait d'un de ces quatre enfants qui possédait un niveau de lecture supérieur à la plupart d'entendants. A partir de ces résultats, ces auteurs ont suggéré que les sourds pourraient s'appuyer sur l'information donnée par la langue des signes (en plus de la lecture labiale) afin d'accéder à la lecture

(Beech & Harris, 1997). Toutefois, l'échange d'information entre les différents codes fournis par la langue des signes et le mot écrit a été infirmé (Krakow & Hanson, 1985). Une autre possibilité pour expliquer les résultats de Harris et Beech (1997) est que la connaissance de la langue des signes à un âge précoce (comme langue maternelle) a favorisé l'apprentissage ultérieur de la langue orale (Mayberry, Lock, & Kazmi, 2002), qui est pour la plupart des sourds une « seconde langue ». En effet, les adultes sourds ayant peu d'expérience précoce de la langue des signes (habituellement il s'agit d'enfants sourds nés de parents entendants qui n'apprennent pas la langue des signes avant le début de la scolarité) présenteraient des performances plus faibles dans la langue orale par rapport au groupe de sourds exposés à la langue des signes depuis leur naissance (généralement des enfants sourds de parents sourds) (Mayberry *et al.*, 2002). Cela serait un cas particulier de l'idée générale de Locke, évoquée auparavant, qui infère que la période de démarrage de l'acquisition d'une langue première a des effets profonds sur l'apprentissage d'une langue seconde. Pour que les enfants finissent par devenir des utilisateurs performants du langage, qu'il soit signé ou non, une exposition précoce au langage est nécessaire (Ducharme & Mayberry, 2005). Un bel exemple de ce point de vue peut être observé dans une autre étude de Mayberry (1993) qui a comparé deux groupes d'adultes sourds. Le premier groupe était constitué de participants nés entendants et ayant appris à parler l'anglais comme première langue, avant de devenir profondément sourd suite à une infection virale. Le deuxième groupe était composé des sourds profonds de naissance appariés pour l'âge au premier groupe et qui avaient eu peu d'expérience linguistique avant leur exposition à la langue des signes à l'école. Deux tâches de langage montrent que les adultes devenus sourds tardivement obtenaient de meilleurs niveaux de performance en langue des signes que les autres sourds qui l'étaient de naissance mais qui n'avaient été stimulés suffisamment au niveau linguistique pendant la période sensible, afin de développer correctement une langue maternelle (Mayberry, 1993).

*A partir des données d'IRMf et comportementales des trois études, nous allons évaluer la possibilité que les mécanismes de lecture utilisés par notre groupe de sourds ressemblent à ceux d'une langue seconde trouvés chez l'entendant. Néanmoins, il est important de souligner que la plupart de notre groupe de sourds a été éduqué chez des parents entendants et n'a pas été stimulé de façon suffisante pendant la période critique afin d'acquérir la langue des signes comme langue maternelle (et aucune autre comme, par exemple, le LPC). Cela aurait des effets sur l'apprentissage d'une autre langue, en particulier la langue l'orale. Nous nous retrouvons ici dans un cas particulier que nous n'observons quasiment jamais chez l'entendant (les études de langue seconde chez l'entendant proviennent des sujets qui possèdent une langue maternelle<sup>9</sup>). Nous devons prendre cela en considération lorsque nous considérerons la possibilité que le sourd utilise la langue orale et sa représentation écrite comme un mécanisme de langue seconde. Ceci dit, les mécanismes peuvent encore se ressembler dans certains aspects (discussion générale).*

---

<sup>9</sup> Mais il existe des cas dramatiques de déprivation sociale (Curtiss, 1977).

## **A.7 HYPOTHESES DE TRAVAIL**

Nous avons déjà énoncé à divers endroits de la section « Le sourd et la lecture » (cf. A.6) les hypothèses de travail qui ont guidé notre recherche. Nous récapitulons ici ces quatre hypothèses écrites de façon opérationnelle comme suit :

1. un traitement phonologique erroné provoque une proportion d'erreurs dans la tâche de jugement visuel de rimes qui ne diffère pas significativement entre le sourd et l'entendant normo-lecteur (analyse n° 1)
2. le lecteur sourd utilise plus la voie phonologique pour résoudre les tâches de jugement visuel de rimes et décision lexicale que l'entendant normo-lecteur (analyse n° 2)
3. le lecteur sourd a une activation cérébrale dans les deux tâches de lecture qui est moins latéralisée que chez l'entendant normo-lecteur (analyse n° 2)
4. le sujet sourd possède un patron de temps de réponse plus long que l'entendant normo-lecteur dans les conditions de la décision lexicale dont le traitement se fait de façon préférentielle à travers la voie phonologique (mots de basse fréquence et pseudomots) (analyse n° 3)

Rappelons que le groupe de sujets sourds de notre étude avait acquis la langue orale essentiellement grâce à la lecture labiale. Ainsi nos quatre hypothèses défendent, dans l'ensemble, l'idée que ce type de sujets sourds ferait d'abord un usage important de la phonologie (analyse 1) et que son faible niveau de lecture paraît répondre à un patron caractéristique d'un sujet entendant mauvais lecteur car comme lui, il fait une surutilisation de la voie phonologique (analyse 2), il a une activation moins latéralisée au niveau de l'activation cérébrale (analyse 2) et il paraît avoir une difficulté dans l'application des règles de CGP (analyse 3).



## B PARTIE EXPERIMENTALE

Nous exposerons ici deux expériences. La première expérience, assez vaste, a été une idée conçue par Marie-Noëlle Metz-Lutz dans le but d'avancer dans la caractérisation du circuit fonctionnel de la lecture chez les personnes sourdes. Dans cette expérience, les deux tâches d'activation sont un jugement visuel de rimes et une décision lexicale réalisés dans un protocole en bloc en IRMf. La création du paradigme et l'élaboration du protocole avec les premiers essais, évaluations et analyses ont été réalisées pendant mon DEA et ma première année de thèse. Partant des résultats obtenus dans cette première expérience, nous présentons trois analyses organisées selon un critère conceptuel afin de donner une cohérence aux hypothèses de travail. La première et la troisième analyse examinent les données comportementales du jugement visuel de rimes et de la décision lexicale respectivement. La deuxième analyse porte sur les données en imagerie fonctionnelle générées par les deux tâches. Les résultats et les analyses des données anatomiques ont fait l'objet d'un article publié (Aparicio, Gounot, Demont, & Metz-Lutz, 2007) et l'analyse des données comportementales sont présentées dans un second article soumis à *Cognitive Neuropsychology*. Cependant, un certain nombre de résultats et des illustrations complémentaires, ainsi que des éléments de discussion nouveaux ont été introduits. Le texte de cette thèse est donc plus complet que celui présenté dans les articles. Enfin, les études de connectivité cérébrale et de corrélation (entre l'activité cérébrale et les données comportementaux) sont présentées comme des résultats complémentaires (cf. B.1.5) et non comme des analyses car la plupart de données n'atteint pas le seuil de significativité statistique. Néanmoins, ces résultats nous permettent de proposer des nouvelles idées concernant le fonctionnement cognitif cérébral du sourd lecteur.

Les limites de l'expérience en bloc nous ont amené à la réalisation d'une deuxième expérience avec les mêmes tâches mais avec un protocole évènementiel. Ce type de protocole nous permet d'aller plus loin dans la vérification des hypothèses de travail, notamment en ce qui concerne les activations cérébrales. Ce paradigme a été conçu au

cours de ma deuxième année de thèse. Les difficultés de recrutement des sujets sourds profonds pour cette étude ne nous ont pas permis de disposer d'un échantillon de taille suffisante pour être en mesure d'analyser et discuter les résultats dans le cadre de cette thèse. Nous en présentons cependant le paradigme mettant l'accent sur le raisonnement qu'a été à l'origine de sa conception (cf. B.2).

## **B.1 EXPERIENCE N° 1 : PROTOCOLE EN BLOC**

Comme nous l'avons dit auparavant, les trois analyses ainsi que les résultats complémentaires qui seront présentés et discutés proviennent de la même expérience en bloc réalisée en IRMf. La première analyse n'utilise que les données comportementales (performance et temps de réponse) du jugement visuel de rimes. La deuxième analyse utilise les données d'activation cérébrale du jugement visuel de rimes et de la décision lexicale. Enfin, dans la troisième analyse, nous utilisons les données comportementales de la décision lexicale. La méthode utilisée dans les deux tâches de cette expérience sur lesquelles portent les trois analyses étant commune à l'ensemble de résultats, est décrite avant de présenter les analyses des résultats.

### **B.1.1 Méthode générale**

#### **B.1.1.1 Sujets**

Vingt-neuf volontaires ont participé à cette expérience. Le groupe de sourds était composé de 13 sujets (5 hommes et 8 femmes) sourds congénitaux profonds avec une perte d'audition allant de 90 à 120 dB (moyenne = 105 dB). Seulement trois sujets de ce groupe avaient au moins un des parents qui était aussi sourd. Ils avaient tous eu une scolarité bilingue (orale et langue des signes). Quatre sujets ont été exposés au LPC pendant une courte période de leur scolarité (moins de deux ans), mais aucun d'entre eux ne l'a utilisé de façon quotidienne. Excepté deux sujets, tous les sourds utilisaient la communication orale et portaient une prothèse auditive uni ou bilatérale. L'intelligibilité de la parole des sujets sourds a été évaluée à partir de la dénomination orale de couleurs et de nombre sur une échelle de 0 à 4 par deux juges. La qualité de la parole était estimée à 2.6 en moyenne.

Le groupe entendant était composé de 16 sujets (7 hommes, 9 femmes). Les deux groupes étaient appariés pour l'âge avec une moyenne de 32 ans et 10 mois (23-43 ans) pour le groupe de sourds et de 34 ans et 9 mois (20-50 ans) pour le groupe d'entendants ( $t = 0.79$  ;

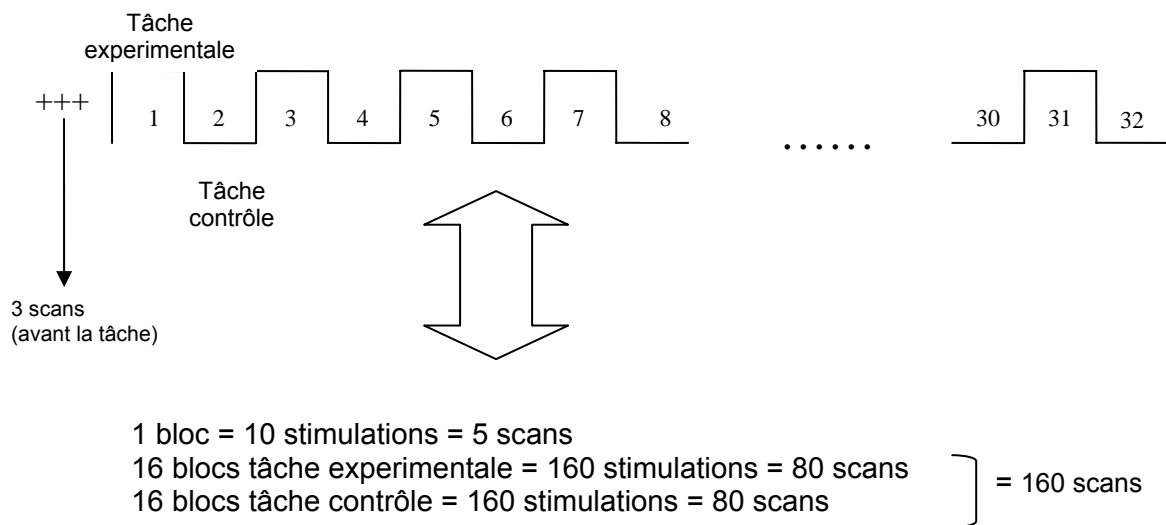
$p = 0.44$ ). Les deux groupes ont été scolarisés durant une période similaire avec une moyenne de 14,57 ans pour les entendants et 13,45 ans pour les sourds ( $t = 0.74$  ;  $p = 0.47$ ) correspondant à la fin de l'éducation secondaire. Leur niveau de lecture a été évalué au moyen du test de Lobrot (Lobrot, 1973), qui consiste à compléter 36 phrases avec un temps maximum de 300 secs et qui fournit un âge de lecture allant jusqu'à l'âge de fin de scolarité primaire, soit 13 ans. Les résultats ont révélé un âge de lecture moyen de 12 ans et 10 mois (12-13) chez l'entendant et de 10 ans et 6 mois chez le sourd (6-13) ( $t = 3.64$  ;  $p < 0.001$ ). Les deux groupes avaient des scores similaires au test D2000, une variante du test des Matrices Progressives, qui mesure de façon non-verbale les capacités cognitives générales. Plus précisément, la moyenne dans le groupe des entendants était de 16,63 tandis que pour les sourds, il était de 15,38 ( $t = 0.73$  ;  $p = 0.47$ ) (Rennes & Kourowski, 2000).

Tous les sujets (sourds et entendants) étaient droitiers, selon les résultats de test d'Edinburgh (Oldfield, 1971), et n'avaient aucun antécédent médical neurologique ou psychiatrique et ne présentaient pas de déficit visuel pouvant affecter la lecture. Les sujets ont donné leur accord par écrit avant de participer à l'étude, qui était approuvée par le Comité Consultatif pour les Personnes Participant à la Recherche Biomédicale de la région d'Alsace (CCPPRB Alsace N° 1).

### **B.1.1.2 Procédure**

#### **B.1.1.2.1 Protocole en IRMf**

Pendant la session d'IRMf, les sujets ont réalisé les deux tâches successivement. Chacune comportait une série de 32 blocs. Les 16 blocs de la tâche expérimentale et les 16 de la tâche contrôle étaient présentés alternativement. Chaque bloc contenait 10 stimulations, ce qui correspondait à 5 scans (2 stimulations par scan). Au total, 160 stimulations (80 scans) de la tâche expérimentale et 160 (80 scans) de la tâche contrôle ont été présentées (voir figure 4 ; p. 69).



**Figure 4** Structure générale du paradigme en bloc pour les deux tâches

Avant le début de chaque série, une croix blanche apparaissait au milieu de l'écran qui indiquait où la stimulation allait apparaître. La présentation de la stimulation ainsi que l'enregistrement de la réponse et du temps de réponse ont été réalisés à l'aide du programme E-Prime (Psychology Software Tools, Pittsburgh, 2000). Avant d'entrer dans la machine d'IRM, tous les sujets étaient entraînés, pour les deux tâches expérimentales et contrôles.

#### **B.1.1.2.2 Jugement visuel de rimes**

Les stimulations de la tâche de jugement visuel de rimes se composaient de 160 paires de mots dont seulement 89 étaient originales (voir la liste 1 de l'annexe). De façon similaire à l'étude de Campbell et Wright (1988), les paires étaient créées afin de satisfaire une des quatre conditions suivantes :

1. rime-homographe (RH) : les items riment et ont une orthographe similaire ("pelle-belle"; /pDI/-/bDI/)
2. non-rime non-homographe (NRNH) : les items ne riment pas et l'orthographe est différente ("miel-page"; /mjDI/-/paF/)

3. rime non-homographe (RNH) : les items riment mais l'orthographe est différente  
"album-somme"; /albCm/-/sCm/)
4. non-rime homographe (NRH) : les items ne riment pas mais l'orthographe est  
similaire ("bille-mille"; /bij/-/mil/)

Les deux premières conditions sont dénommées consistantes car elles sont congruentes en orthographe et phonologie tandis que les deux dernières conditions sont appelées inconsistantes car elles ne sont pas congruentes en orthographe et phonologie. Chaque paire des conditions inconsistantes contient au moins un mot qui est irrégulier concernant la conversion graphophonologique car le graphème ne correspond pas au patron phonologique le plus dominant (par ex. femme qui se dit /fam/ au lieu de /fDm/). Dans une étude pilote menée avec des sujets sourds, le temps de réponse (TR) pouvait, parfois, dépasser les 2500 ms. En conséquence, la période de stimulation était fixée à 3000 ms, ce qui permettait aux sourds de donner aisément une réponse. Chaque paire de mots était présentée pendant 750 ms et suivi d'un écran noir qui se maintenait pendant les 2250 ms restantes. Le sujet devait juger si les mots de la paire rimaient ou non et fournir la réponse au moyen des boutons réponses d'une souris d'ordinateur (réponse oui, bouton droit ou réponse non, bouton gauche). La performance et le temps de réponse (TR) ont été enregistrés avec le logiciel E-Prime (Psychology Software Tools, Pittsburgh, 2000).

La tâche contrôle consiste en une décision d'identité des deux suites de caractères composées d'une même consonne en minuscule ou majuscule (ex : BBbB / BBbB réponse oui (bouton droit) ; DDdD / DdDD réponse non (bouton gauche). Elles sont présentées aussi pendant 750 ms avec une période de stimulation de 3000 ms (i.e. l'intervalle interstimuli étant à 2250 ms). La réponse était fournie au moyen des boutons réponse. La durée de la tâche est de 16 min approximativement (32 blocs de 30 secs).

#### **B.1.1.2.3 *Décision lexicale***

Chaque bloc contenait 10 chaînes de caractères qui s'affichaient individuellement pendant 250 ms suivies d'un écran noir durant 2250 ms, assurant une période de stimulation de 2500

ms. Ces paramètres étaient choisis afin de laisser suffisamment de temps à tous les sujets, notamment les sourds, pour répondre. Dans la condition expérimentale, 160 mots et pseudomots (10 par bloc) étaient présentés au sujet. Ils étaient extraits aléatoirement d'une longue liste de mots et pseudomots. Les mots sont des chaînes alphabétiques de 3 à 7 lettres de longueur appartenant au lexique français. Les mots étaient réguliers et contrôlés par leur degré d'imagerie et de « concrétude » (Content, Mousty, & Radeau, 1990). Les pseudomots étaient le résultat de la substitution, également distribuée à travers la chaîne de caractères, d'une lettre à partir de la liste de mots. Tous les pseudomots étaient prononçables, non homophones (i.e. leur prononciation ne produisait pas un mot) et construits de façon à que leur orthographe soit plausible. À chaque présentation, le sujet devait fournir une réponse motrice au moyen de boutons réponses d'une souris d'ordinateur (bouton droit : oui, la chaîne de caractères est un mot ; bouton gauche : non, ce n'est pas un mot du lexique).

La tâche utilisée ici comme référence ou contrôle et qui avait le but d'enlever l'activation ne relevant pas strictement du processus de décision lexicale, était une tâche de décision sur la présence d'une barre verticale dans une suite de 4 à 6 caractères pictographiques, présentés aux sujets au même rythme que les items de la tâche expérimentale (10 par bloc et présentés pendant 250 ms avec une période de stimulation de 2500 ms). Le sujet devait fournir, comme dans la condition expérimentale, une réponse au moyen des boutons réponse selon qu'il existait ou pas une barre verticale qui dépassait la limite supérieure des autres caractères. La durée totale de la tâche était de 14 min approximativement (32 blocs de 25 secs).

### **B.1.1.3 Entraînement**

Pour communiquer avec les sujets sourds, nous avons bénéficié de la collaboration d'une interprète professionnelle en langue des signes. Les consignes des tâches étaient soigneusement expliquées. En outre, les sujets ont été entraînés avant de réaliser la passation en IRMf. Pendant l'entraînement, ils ont exécuté les deux tâches expérimentales

et les deux tâches contrôles de façon analogue à la passation en IRMf. Après chaque réponse, les sujets étaient informés de leur performance.

Nous avons mis particulièrement l'accent sur l'explication du concept de la rime aux sourds : « ... vous devrez faire attention aux sons de la fin du mot. Je sais que cela peut être difficile pour vous mais il y a des manières pour vous d'y arriver... ». La différence entre l'orthographe du mot et la rime était clairement mentionnée. Malgré les explications sur le concept de la rime données auparavant, les sujets sourds étaient parfois surpris par les erreurs commises dans les items appartenant aux conditions inconsistantes du jugement visuel de rimes. Dans ce cas, le concept de la rime était à nouveau expliqué. Si cela s'avérait nécessaire, l'entraînement se répétait jusqu'à ce que les sujets manifestent une bonne compréhension de la tâche.



## **B.1.2 Analyse n° 1 : usage de la phonologie chez le sourd ?**

Le sujet sourd obtient des faibles performances dans la plupart de tâches pour lesquelles il est nécessaire de recourir à un traitement phonologique. Réalise-t-il un autre type de traitement hors phonologique ou fait-il un traitement phonologique erroné ? Nous avons effectué une analyse des données comportementales du jugement visuel de rimes (performances et temps de réponse) afin de déterminer la proportion d'erreurs pouvant être liées au traitement phonologique.

### **B.1.2.1 Introduction**

Les performances du sourd dans le jugement visuel de rimes restent habituellement inférieures à celles de l'entendant, mais sont au-dessus du hasard, ce qui semble témoigner d'une utilisation des connaissances phonologiques du mot (Campbell & Wright, 1988; Hanson & Fowler, 1987). Il a été proposé que les faibles performances du sourd dans la tâche de jugement visuel de rimes proviendraient d'une tendance à prendre une décision sur la base des formes visuo-orthographiques des mots, ce qui générerait plus d'erreurs notamment dans les paires d'items inconsistantes (par ex. fille-ville). Une analyse plus approfondie des erreurs peut nous aider à préciser la source des erreurs et par conséquent à éclairer la stratégie utilisée par les sourds dans l'accomplissement de la tâche de jugement visuel de rimes. En effet, les erreurs pourraient ne pas être seulement dues à la similitude visuo-orthographique des mots mais provenir aussi directement d'une mauvaise représentation phonologique, propre au sujet sourd et qui conduirait à une décision erronée.

Il est important de souligner que le traitement orthographique dont nous parlons ici est différent du traitement du mot écrit par la voie orthographique, d'adressage ou voie directe du modèle de lecture à deux voies. Le premier traitement fait surtout référence à la détection des lettres du mot qui est normalement située avant l'entrée des deux voies (voir figure 1 et 3 ; p. 30 et 41 respectivement) tandis que le deuxième est un traitement qui à partir des caractéristiques orthographiques, va aboutir à la reconnaissance du mot.

Une analyse détaillée des erreurs du jugement de rimes pourrait nous permettre de distinguer si derrière cette erreur, le sujet s'est intéressé exclusivement aux traits orthographiques ou au contraire est parvenu à réaliser une analyse phonologique qui à terme s'avère erronée. Plus précisément, la mesure de temps de réponse des erreurs peut nous permettre d'examiner et de préciser l'origine des erreurs (i.e. phonologiques ou orthographiques). La logique de cette distinction est fondée sur l'idée que le traitement des conditions inconsistantes peut nécessiter deux étapes pour parvenir à une réponse correcte : la première étant l'inhibition de la forme orthographique du mot et la deuxième le traitement correct de la forme phonologique du mot (voir figure 4 ; p. 75). Nous pouvons dès lors nous demander si les erreurs du sujet sourd vont être liées à une difficulté dans l'inhibition du mot ou plutôt à un traitement phonologique inadéquat. Le premier type d'erreur sera identifié comme une « erreur orthographique » et le deuxième comme une « erreur phonologique »

Des analyses d'erreur ont été déjà réalisées dans d'autres tâches phonologiques comme la génération de rimes, dans laquelle le lecteur sourd montrait une plus grande proportion d'erreurs liées à l'orthographe qu'à la phonologie (Hanson & McGarr, 1989). Toutefois, la tâche de génération de rimes et notre tâche de jugement visuel de rimes sont différentes. La première est une tâche de réponse ouverte tandis que le jugement est, en quelque sorte, une tâche de décision forcée. Dans une tâche de génération de rimes, le sujet sourd peut générer plus de rimes orthographiquement similaires (toile-voile) que différentes (toile-poêle) parce que les premières seraient plus faciles à générer mais cela ne signifie pas que la rime orthographiquement différente (toile-poêle) ne serait pas traitée phonologiquement lorsque le sujet sourd doit décider si les mots riment ou pas. Contrairement aux études de génération de rimes, à notre connaissance, aucune analyse d'erreurs dans une tâche de jugement visuel de rimes n'a été réalisée chez le sourd.



De quelle manière ces erreurs peuvent-elles être catégorisées ? Pour cela, nous pouvons utiliser la méthode des facteurs additifs proposée par Stenberg (1969). Cette méthode suppose que le TR est le reflet des différentes étapes du traitement de l'information dans un modèle séquentiel (Donders, 1969; Sternberg, 1969). Dans les modèles de lecture, nous pouvons placer l'étape d'inhibition du traitement orthographique du mot entre le traitement visuo-perceptif du mot et le traitement de la forme visuelle du mot. Ces deux traitements ont été proposés comme étant situés avant l'entrée dans le modèle de lecture à deux voies (Jobard et al., 2003; Warrington & Shallice, 1980). Il paraît donc approprié de suggérer que le processus d'inhibition a lieu aussi avant la séparation des deux voies (voir figure 3 ; p. 41). Ainsi, nous pouvons proposer un modèle séquentiel dans lequel l'analyse visuo-orthographique des lettres du mot serait réalisée avant le traitement phonologique. Dans un tel modèle (voir figure 4 ; p. 75), le TR liée à une erreur orthographique (qui résulterait de l'accomplissement d'une seule étape de traitement) dans les paires de mots inconsistantes devrait être plus court que les TR des réponses correctes pour le même item (qui aura nécessité les deux étapes de traitement). En revanche, le TR lié à une erreur phonologique devrait être similaire (ou plus longue) que les TR des réponses correctes pour le même item.

### **B.1.2.2 Méthode d'analyse**

#### **B.1.2.2.1 Catégorisation des erreurs**

Afin de catégoriser une par une, les erreurs des conditions inconsistantes (NRH et RNH) en erreurs phonologiques ou orthographiques, nous avons effectué deux comparaisons. En effet, le TR appartenant à une réponse erronée était comparé d'un côté au TR moyen des réponses correctes pour le même item réalisé par le groupe (entendants ou sourds) et d'un autre côté au TR moyen des réponses correctes réalisé par le groupe (entendants ou sourds) de tous les items appartenant à la condition consistante qui servirait de contrôle (RH pour NRH et NRNH pour RNH). La logique pour la première comparaison était de supposer que si les TR des erreurs dans les conditions inconsistantes résultent d'une analyse de type orthographique, ils seront inférieurs au TR moyen des réponses correctes du même item car

nous pouvons admettre que les réponses correctes ont été traitées phonologiquement après inhibition du traitement visuo-orthographique et que les TR seront de fait plus longs. En revanche, pour la même raison, si les TR des erreurs des conditions inconsistantes résultent d'une analyse de type phonologique, ils devraient être, équivalents voire supérieurs au TR moyen des réponses correctes (voir figure 4 ; p. 75). La deuxième comparaison a une fonction plutôt de contrôle et sa logique est de supposer que si les TR des erreurs des conditions inconsistantes résultent de l'analyse orthographique, ils devraient être similaires ou inférieurs (mais en aucun cas supérieurs) au TR moyen des réponses correctes des conditions consistantes (RH ou NRNH) car nombre de ces réponses correctes peuvent se baser sur la seule orthographe. Inversement, et pour la même raison, si les TR des erreurs des conditions inconsistantes résultent d'un traitement phonologique, ils devraient être supérieurs au TR moyen des réponses correctes des conditions consistantes.

Plus précisément, lorsque le TR d'une erreur de la condition RNH (ou NRH) est significativement inférieur ( $p < 0.05$ ) au TR moyen des réponses correctes du même item et similaire ou plus petit que le TR moyen des réponses correctes de la condition NRNH (ou RH), l'erreur est catégorisée comme une erreur orthographique. En revanche, lorsque le TR d'une erreur de la condition RNH (ou NRH) est similaire ou supérieur au TR moyen des réponses correctes du même item et supérieur ( $p < 0.05$ ) au TR moyen des réponses correctes de la condition NRNH (ou RH), cette erreur est catégorisée comme une erreur phonologique (voir figure 5 et tableau 1 ; p. 75 et 78 respectivement).

Le tableau 1 décrit les deux comparaisons nécessaires à la catégorisation d'une erreur.

**Tableau 1** - descriptif de la logique de catégorisation d'erreurs avec un exemple d'une erreur de la condition NRH (tapis-iris)

Type d'erreur	
Orthographique	Phonologique
TR erreur (tapis-iris) < moyen TR rép correctes (tapis-iris)*	TR erreur (tapis-iris) ≥ moyen TR rép correctes (tapis-iris)*
TR erreur (tapis-iris) ≤ moyen TR rép correctes (RH)*	TR erreur (tapis-iris) > moyen TR rép correctes (RH)*

\* p < 0.05

Chaque erreur étant soumise à ces comparaisons (par ex. chaque erreur observée à la paire « tapis-iris »), il est possible que pour le même item nous trouvions des erreurs orthographiques et des erreurs phonologiques.

Les deux conditions doivent être remplies. Si une erreur ne remplit pas une des deux conditions, elle sera écartée (voir figure 8 ; p. 82).

### B.1.2.3 Résultats

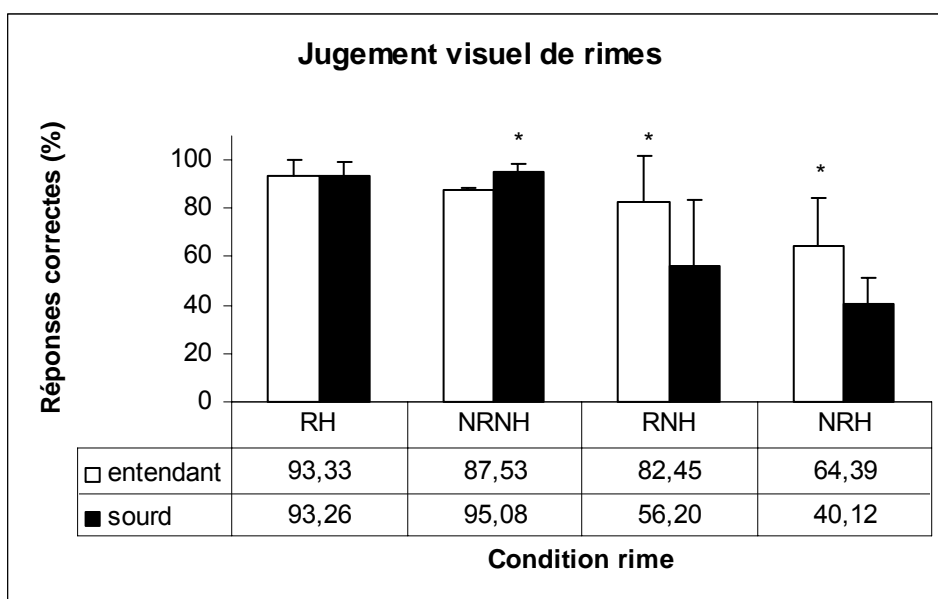
Il est arrivé que le sujet ait eu à répondre au même item plusieurs fois. Afin d'éviter un effet d'apprentissage, seule la première réponse d'un sujet à un item a été prise en compte dans l'analyse.

#### B.1.2.3.1 Analyse de la performance

La performance par groupe en fonction de la condition de rime est présentée dans la figure 6 (p. 80). En premier lieu, et afin d'examiner si les sujets sourds ont réalisé cette tâche à un niveau au-dessus du hasard (50 %), un test t a été réalisé d'un côté sur les items homographes (RH et NRH) et d'un autre sur les non homographes (RNH et NRNH). Les pourcentages moyens de la performance des sourds dans les items homographes a été de 66.7 % et dans les items non homographes de 75.6 %. L'analyse a montré que ces valeurs

sont au-dessus du hasard (50 %) pour les homographes ( $t = 8.14$  ;  $p < 0.001$ ) et pour les non homographes ( $t = 6.24$  ;  $p < 0.001$ ).

En deuxième lieu, les valeurs des quatre conditions de rime de la figure 6 (p. 80) ont été introduites dans une analyse de variance de 2 (groupe : sourd, entendant) x 4 (condition rime : RH, NRNH, RNH, NRH) avec la condition de rime comme variable intra-sujet (mesure répétée). Les résultats de l'analyse montrent un effet significatif du groupe,  $F(1,27) = 10.52$ ,  $p < .01$ , de la condition rime,  $F(3,81) = 58.26$ ,  $p < .001$  et d'interaction,  $F(3,81) = 11.13$ ,  $p < .001$ . Les analyses post-hoc (Bonferroni-Dunn) montrent une différence entre toutes les modalités de la condition rime, sauf pour la comparaison entre les conditions consistantes RH vs NRNH ( $p > .20$ ). De façon complémentaire, des tests t sur la performance ont été réalisés pour chaque modalité de la condition rime afin de préciser d'éventuelles différences entre les groupes. Nous avons trouvé une meilleure performance chez le sourd dans la paire NRNH et une meilleure performance chez l'entendant aux paires RNH et NRH ( $p < .01$  dans tous les cas) (figure 6 ; p. 80).



**Figure 6** Pourcentage moyen des réponses correctes dans la tâche de jugement visuel de rimes en fonction du type de rime chez les entendants et les sourds. Les barres d'erreurs correspondent à la déviation standard.

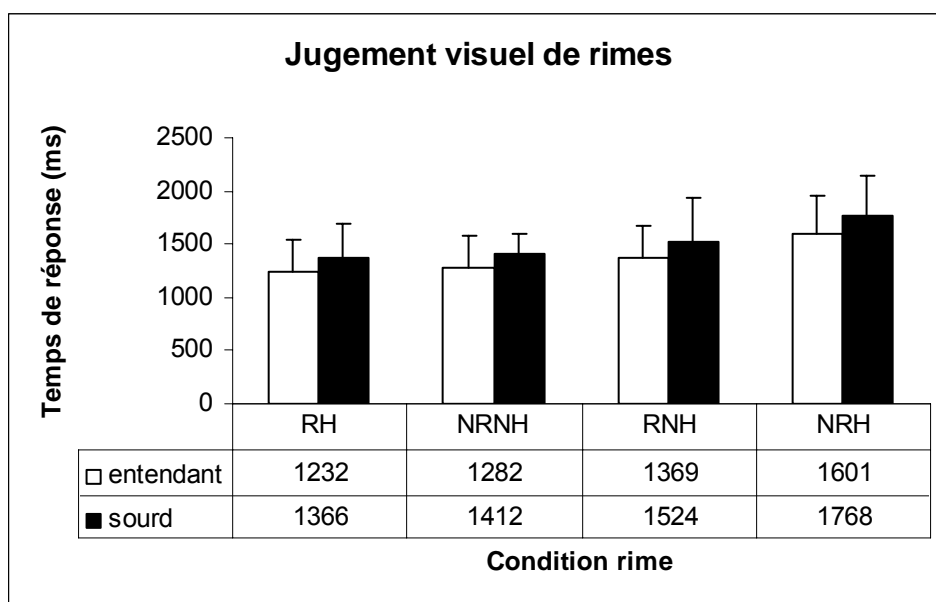
\*  $p < 0.01$ . Les valeurs bilatérales de  $p$  sont calculées à partir de l'hypothèse nulle qui stipule que les performances des deux groupes (entendants et sourds) sont égales.

(RH : rime homographe, NRNH : non-rime non-homographe; RNH : rime non-homographe; NRH : non-rime homographe)

#### **B.1.2.3.2 Analyse des temps de réponse**

La figure 7 (p. 81) montre la moyenne des temps de réponses correctes dans les deux groupes pour chaque type de rime. Ces données ont été introduites dans un analyse de variance de 2 (groupe : sourd, entendant) x 4 (condition rime : RH, NRNH, RNH, NRH), avec la condition rime comme variable intra-sujet (mesure répétée). Les résultats n'ont pas montré de différence significative entre les groupes,  $F(1, 27) = 1.87$ ,  $p > .10$ , ni d'interaction,  $F < 1$ . Il existe toutefois, une différence significative entre les conditions de rime  $F(3, 81) = 28.62$ ,  $p < .001$ .



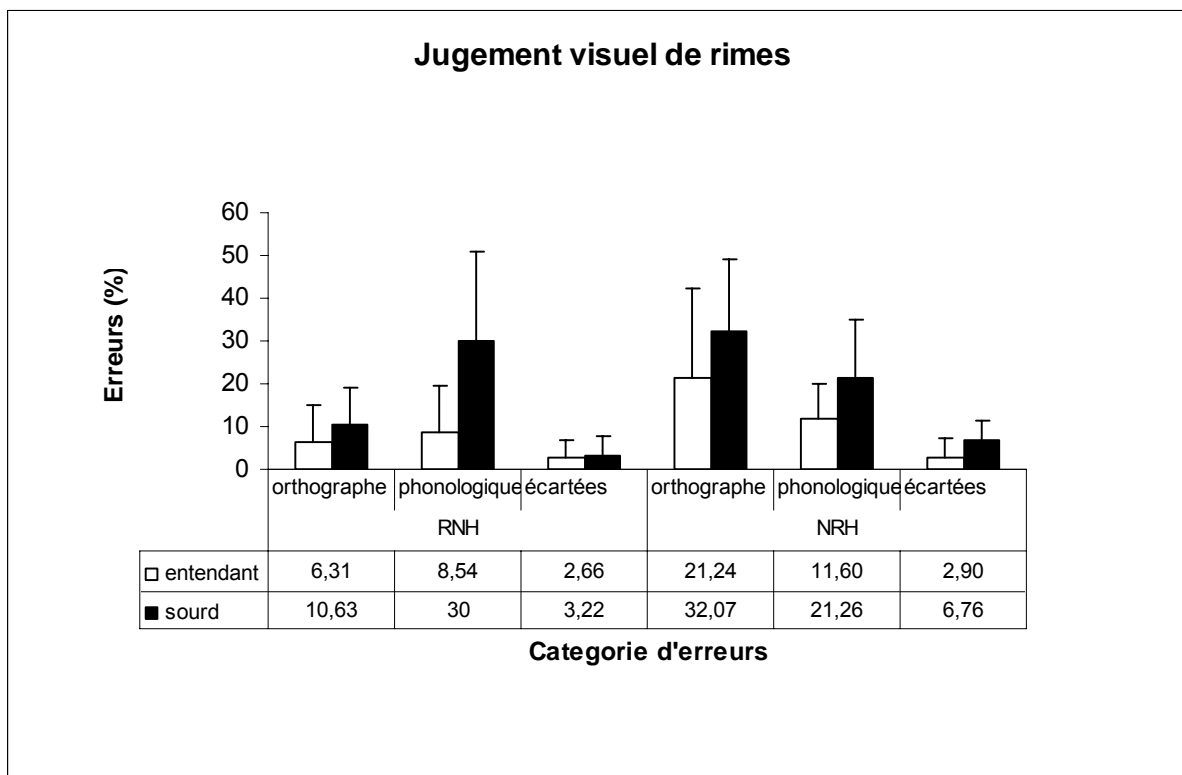


**Figure 7** Moyenne de temps de réponse correctes dans la tâche de jugement visuel de rimes en fonction du type de rime chez les entendants et les sourds. Les barres d'erreurs correspondent à la déviation standard. Les valeurs bilatérales de  $p$  sont calculées à partir de l'hypothèse nulle qui stipule que les performances des deux groupes (entendants et sourds) sont égales.

(RH : rime homographe, NRNH : non-rime non-homographe; RNH : rime non-homographe; NRH : non-rime homographe)

### **B.1.2.3.3 Catégorisation de l'erreur : erreurs orthographique ou phonologique**

La plupart des erreurs ont pu être catégorisées soit comme des erreurs orthographiques, soit comme des erreurs phonologiques. Ceci conforte l'idée de l'existence de ces deux types d'erreurs (voir figure 8 ; p. 82). Très peu de réponses n'ont pas rempli les critères de catégorisation et ont été écartées. Par exemple, lorsque le temps de réponse d'une erreur était similaire au TR moyen des réponses correctes mais simultanément n'était pas supérieur au TR moyen des réponses de la condition contrôle correspondante (voir tableau 1).

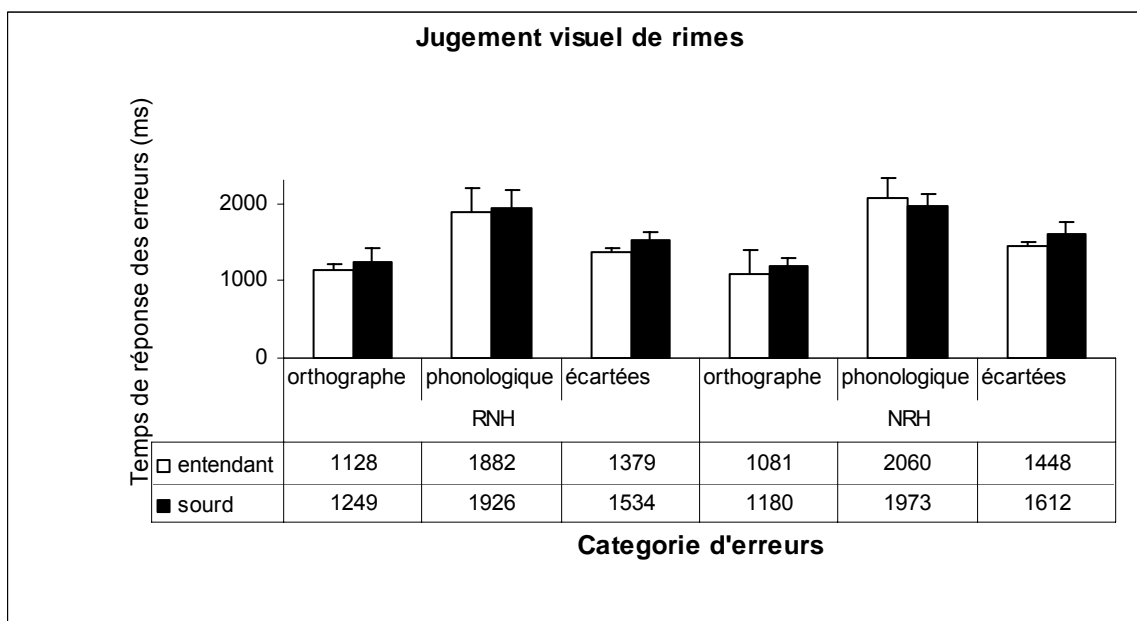


**Figure 8** Pourcentage moyen des erreurs du jugement visuel de rimes en fonction du type de stratégie employée lors du jugement des paires de rimes inconsistantes chez les entendants et les sourds. Les barres d'erreurs correspondent à la déviation standard.

(RNH: rime non-homographe; NRH: non-rime homographe)

Afin de pouvoir comparer dans les deux groupes, la distribution des erreurs de chaque catégorie, nous avons réalisé pour chaque condition inconsistante de la rime (NRH et RNH), une analyse de variance de 2 (groupe : entendant, sourd) x 2 (catégorie d'erreurs : orthographique, phonologique) avec la « catégorie des erreurs » comme une variable intra-sujet. Pour les deux conditions, nous avons trouvé un effet significatif du groupe ( $F(1,27) = 10.16, p < .01$  et  $F(1,27) = 6.59, p < .05$  pour la condition RNH et NRH respectivement) et de catégorie d'erreurs ( $F(1,27) = 8.65, p < .01$  et  $F(1,27) = 5.66, p < .05$  pour la condition RNH et NRH respectivement). L'interaction groupe par catégorie était significative dans la condition RNH ( $F(1,27) = 4.28, p < .05$ ) mais pas dans la condition NRH ( $F < 1$ ). L'interaction était due à une plus grande différence entre entendants et sourds pour les erreurs phonologiques que pour les erreurs orthographiques.

Enfin, les résultats de temps de réponse des erreurs orthographiques et phonologiques sont présentés dans la figure 9 (p. 83). Comme pour le pourcentage d'erreurs, nous avons réalisé pour chaque condition (RNH et NRH) une analyse de variance de 2 (groupe : entendant, sourd) x 2 (catégorie d'erreurs : orthographique, phonologique) avec la « catégorie des erreurs » comme une variable intra-sujet. Pour les deux conditions, nous avons trouvé une différence entre les temps de réponse d'erreurs (TR erreur phonologique > TR erreur orthographique) ( $F(1,14) = 70.93, p < .01$  et  $F(1,17) = 103.57, p < .01$  pour la condition RNH et NRH respectivement) mais pas de différence entre les groupes ( $F(1,14) = 2.96, p > 0.1$  et  $F < 1$  pour la condition RNH et NRH respectivement) et pas d'interaction entre les variables ( $F < 1$  pour les deux conditions).



**Figure 9** Temps de réponse moyen en fonction du type de stratégie employée (orthographique vs phonologique) pendant le jugement des paires de rimes inconsistantes chez les entendants et les sourds. Les barres d'erreurs correspondent à la déviation standard.

#### **B.1.2.4 Discussion**

*Les erreurs du jugement visuel de rimes chez le sourd sont plus liées à un traitement phonologique qu'à un traitement orthographique des mots*

En premier lieu, nos résultats confirment ceux d'autres études (Campbell & Wright, 1988; Hanson & McGarr, 1989) montrant que le sujet sourd est capable d'atteindre un niveau de performance au-dessus du hasard dans une tâche de jugement visuel de rimes comparable à la nôtre, ce qui atteste l'usage de la phonologie lors de la lecture chez le sourd. Néanmoins, les performances des sourds restent inférieures à celles de l'entendant. Plus précisément, il a été montré une dissociation entre les items des conditions consistantes, où la performance est semblable à celle de l'entendant, et les items des conditions inconsistantes (RNH et NRH) où la performance des sourds est inférieure à celle de l'entendant (figure 6 ; p. 80). Pour expliquer cela, il a été suggéré que le jugement visuel de rimes chez le sourd pourrait être fortement basé sur la similarité visuelle de l'orthographe (Campbell & Wright, 1988), ce qui est à l'origine des erreurs dans les conditions inconsistantes. Toutefois, nous ne pouvons pas exclure définitivement l'hypothèse d'un traitement phonologique erroné comme étant à la base des erreurs du jugement visuel de rimes. En effet, à la différence des conditions consistantes, dans lesquelles l'orthographe et la phonologie du mot sont congruentes et avec lesquelles un jugement correct peut se fonder indifféremment sur les traits orthographiques du mot ou sur sa phonologie, les conditions inconsistantes paraissent nécessiter deux étapes pour mener à bien la décision : l'inhibition du jugement visuel basé sur l'orthographe du mot et le traitement correct de la phonologie du mot (voir figure 4 ; p. 75). Nous avons réalisé dans cette étude une catégorisation des erreurs, basée sur la comparaison des temps de réponses erronées et des temps de réponses correctes des paires de mots inconsistantes. Cette catégorisation nous permet de suggérer qu'une grande partie des réponses erronées lors du jugement visuel de rimes par le sourd résultent d'un traitement phonologique (voir figure 8 ; p. 82). Plus important, nous avons trouvé une interaction dans la condition RNH, qui est due à une

différence entre sourds et entendants plus grande pour les erreurs phonologiques que pour les erreurs orthographiques. Cela suggère que le plus grand nombre d'erreurs dans la condition RNH observées des sourds par rapport aux entendants peut être mieux expliqué par un traitement phonologique inadéquat que par un jugement visuel basé sur les traits orthographiques du mot. Autrement dit, un traitement phonologique erroné aurait plus de poids dans les erreurs du sourd que dans les erreurs de l'entendant. Ce résultat nous permet d'avancer sur la question qui concerne l'utilisation de la phonologie chez le sourd. Jusqu'à cette étude, l'existence du traitement phonologique chez le sourd avait été démontrée à partir de la performance, c'est-à-dire des bonnes réponses, qui était souvent supérieure au hasard. Notre analyse montre à présent que les erreurs peuvent, elles aussi, avoir une origine phonologique. Ce résultat suggère que le traitement phonologique chez le sourd est plus notable que l'on pouvait penser car il serait présent pour les bonnes réponses et pour les erreurs. Une autre question serait de savoir de quelle nature est ce traitement phonologique inadéquat qui expliquerait pourquoi les sourds réalisent un nombre important d'erreurs. Ce point sera discuté dans la deuxième analyse.

Les résultats de TR des réponses correctes et erronées ont montré, dans la plupart de cas, des valeurs légèrement supérieures chez les sourds par rapport aux entendants (voir figures 7 et 9). Toutefois, ces différences n'atteignent pas le seuil de significativité statistique. En outre, aucune interaction ne s'avère significative (en fait les écarts entre les groupes dans les différents types de rime restent pratiquement constants). Ces résultats paraissent écarter une différence qualitative au niveau du traitement des items. Néanmoins, il est nécessaire de garder à l'esprit que les sourds commettent beaucoup plus d'erreurs que les entendants et comme les TR des erreurs sont plus longs que celles des bonnes réponses, le processus de traitement global de la tâche devient plus long, et probablement plus coûteux aussi, pour le sourd.

Enfin, il est important de signaler que dans le jugement visuel de rimes la demande d'un traitement phonologique est explicite et que, par conséquent, l'usage de la phonologie chez

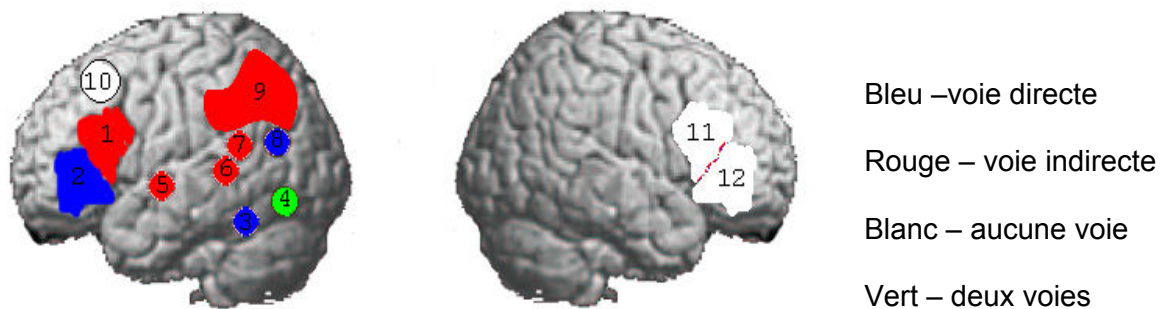
le sourd peut avoir été induit par la « demande » précisée particulièrement lors de la procédure d'entraînement qui mettait notamment l'accent sur le concept de la rime. En effet, en plus des explications conceptuelles de la rime, tous nos sujets sourds ont été entraînés et recevaient pendant cet entraînement une information sur leur performance pour chaque item (cf. B1.1.3). L'importance de l'entraînement avait été déjà évoquée par Sterne et Goswami comme un facteur qui peut expliquer la variabilité trouvée dans les différentes études de la rime chez le sourd (Sterne & Goswami, 2000). Un entraînement comme le nôtre a vraisemblablement aidé les sujets sourds à bien comprendre le concept de la rime et à bien intégrer la demande phonologique que nous faisons, ce qui pourrait avoir permis au sujet de réorganiser la façon de faire face à la tâche et par là appliquer la stratégie phonologique observée.

### **B.1.3 Analyse n° 2 : Une surutilisation de la voie phonologique ?**

La première étude que nous venons de voir suggère que le traitement phonologique explique en partie les faibles performances des lecteurs sourds mais elles ne nous révèlent pas l'aspect spécifique du traitement phonologique qui empêche le sourd d'avoir une bonne performance. Que se passe-t-il au niveau du traitement phonologique qui le conduit à commettre autant d'erreurs ? Afin d'aborder cette question, nous allons analyser les données d'activation obtenues en IRMf à partir de la tâche de jugement visuel de rimes et la décision lexicale.

#### **B.1.3.1 Introduction**

Les études en IRMf introduites dans la partie théorique (cf. neuroanatomie de la lecture) et notamment les méta-analyses, comme celle de Jobard *et al.* (2003), ont permis d'identifier deux réseaux fonctionnels indépendants qui correspondraient aux voies phonologique et orthographique du modèle de lecture à deux voies (voir figure 3 ; p. 41). Ici, la question essentielle qui a conduit cette analyse est de savoir si le lecteur sourd s'appuie plus sur le réseau orthographique ou phonologique lorsqu'il est confronté à l'écrit. Afin de pouvoir répondre à cette question, nous avons réalisé une étude de l'activation cérébrale du jugement visuel de rimes et de la décision lexicale dans des régions dont l'implication dans l'une des deux voies du modèle de lecture à deux voies a été mise en évidence. Ces régions d'étude seront nos régions d'intérêt (RDI) et elles ont été sélectionnées notamment à partir des régions proposées dans la méta-analyse de Jobard (voir figure 3 ; p. 41) mais aussi à partir des données de la littérature sur l'activité cérébrale de la lecture. Les RDI sélectionnées sont répertoriées dans la figure 10.



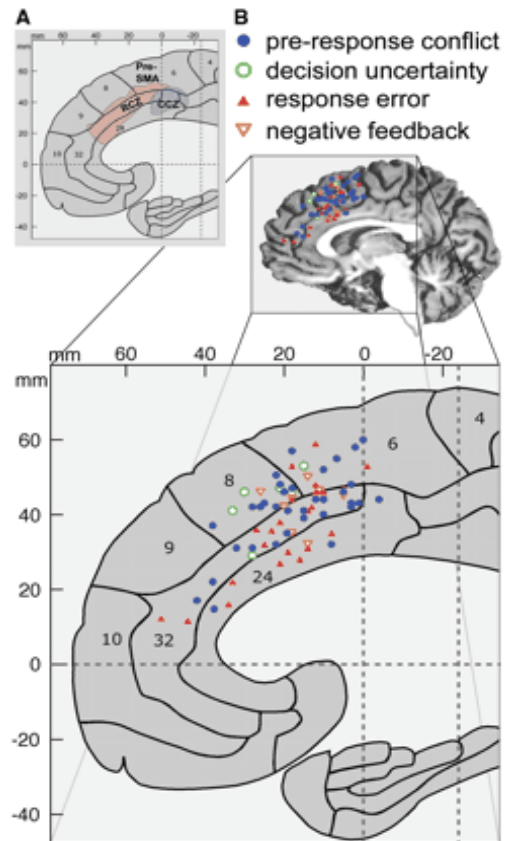
**Figure 10** : Vue générale des régions d'intérêt (RDI) sélectionnées pour la comparaison du niveau d'activation entre les groupes d'entendants et des sourds dans les deux tâches de lecture. (1) et (2) sont les aires de Brodmann 44 et 45 de l'hémisphère gauche tandis que (11) et (12) sont leurs aires homologues dans l'hémisphère droit. (9) est la région anatomique du lobe pariétal inférieur. Les autres RDI sont des sphères qui proviennent des deux méta-analyses de l'anatomie fonctionnelle de la lecture. La localisation ainsi que le rayon des sphères dans les figures sont approximatifs. Les coordonnées précises sont indiquées dans le tableau 2 (cf. B.1.3.2.2.2).

Les régions colorées en bleu appartiennent à la voie directe tandis que les régions colorées en rouge appartiennent à la voie indirecte. La région 4 (en vert) est liée au traitement qui a lieu avant la division en deux voies.

Les régions du lobe temporal et temporo-occipital (régions 3-8) correspondent à celles de la méta-analyse de Jobard *et al.* (2003) (voir figure 3 et 10 ; p. 41 et 88 respectivement). Les autres régions ont été créées à partir d'autres données et cela pour différentes raisons. En premier lieu, nous avons pris toute la région anatomique du lobe pariétal inférieur gauche (région 9), ayant rajouté au gyrus supramarginal, déjà proposé par Jobard *et al.* (2003), le gyrus angulaire car quelques travaux montrent que l'implication des deux aires du lobe pariétal inférieur autour de cette région (gyrus supramarginal et gyrus angulaire) est importante pour la conversion entre l'orthographe et la phonologie (Booth *et al.*, 2002, 2004). En deuxième lieu, nous avons pris comme base dans le gyrus frontal inférieur gauche les aires histologiques AB 44 et 45 (régions 1-2) au lieu des aires anatomiques (*pars opercularis* et *triangularis*) car au



niveau fonctionnel ce sont les aires histologiques qui sont les plus référencées (Amunts et al., 1999; Buckner et al., 1996; Damasio, 1992; Fiebach et al., 2002; Fiez, 1997) En troisième lieu et de façon particulièrement importante, nous avons pris les aires de Brodmann 44 et 45 de l'hémisphère droit (régions 11-12) afin de savoir s'il existe chez le sourd une activation de ces régions. La raison en est que plusieurs études en neuroimagerie cérébrale ont montré que les lecteurs en difficulté activent souvent le gyrus frontal inférieur droit, peut être comme moyen de compensation fonctionnelle (Pugh *et al.*, 2000; S. E. Shaywitz *et al.*, 1998). Si le sourd possède un patron semblable aux lecteurs entendants en difficulté nous devrions retrouver une activation du GFI droit. Une étude tachistoscopique du jugement visuel de rimes chez le sourd nous le suggère. En effet, les données de cette étude ont montré une bi latéralisation plus importante chez les sujets sourds par rapport à l'entendant (D'Hondt & Leybaert, 2003). D'autres études en neuroimagerie fonctionnelle de la lecture basée sur la compréhension des phrases écrites (Neville *et al.*, 1998) ou la simple stimulation par un texte écrit (Dufour, Brochard, Despres, Scheiber, & Robert, 2004) ont montré que les lecteurs sourds ne possèdent pas le même degré d'asymétrie hémisphérique et de latéralisation hémisphérique gauche que les entendants normo-lecteurs. Enfin, nous avons ajouté une région anatomique qui est souvent liée à l'effort, la difficulté et l'incertitude de réponse de la tâche, à savoir le cortex préfrontal médial (Kiehl, Liddle, & Hopfinger, 2000; Milham *et al.*, 2001; Ullsperger & von Cramon, 2004). Si le sourd activait ces régions de façon importante, contrairement au lecteur entendant, cela conforterait l'idée d'un effort lié à la difficulté de la tâche. La spécification spatiale de cette RDI provient d'une autre méta-analyse (Ridderinkhof, Ullsperger, Crone, & Nieuwenhuis, 2004) (voir figure 11 ; p. 90).



**Figure 11** : points d'activations à partir d'une méta-analyse de 38 études en IRMf impliquées dans le conflit, l'incertitude, l'erreur ou le retour d'information négative (liée à une fausse réponse) sur une carte schématique des aires anatomiques autour du cortex frontal médian qui incluent le cortex cingulaire (rostral et caudal) et l'aire motrice supplémentaire (Ridderinkhof et al., 2004). Les coordonnées moyennes de ces études sont présentées dans la table 2 de la section méthodes (cf. B.1.3.2.2.2)

La comparaison de l'activation des RDI pour les deux tâches mentionnées chez les lecteurs sourds et entendants nous permettra de confirmer si les sourds s'appuient plus sur les régions liées à la voie orthographique ou phonologique. Si le sourd s'appuie plus sur la voie orthographique, nous espérons obtenir une activation plus importante dans les régions d'intérêt supposées liées à la voie directe (régions 2-3 et 8 de la figure 10). Inversement, si le sourd utilise la voie phonologique, cela devrait se refléter par une plus grande activation dans les RDI appartenant au réseau de cette voie (régions 1, 5-7 et 9 de la figure 10). De plus, nous pouvons espérer que si la personne sourde se révèle comme un lecteur en

difficulté comparable au mauvais lecteur entendant, il montrerait aussi une activation des régions hémisphériques droites (régions 11-12 de la figure 10).

Nous venons de le dire, cette analyse en RDI est réalisée à partir de l'activation obtenue par deux tâches de lecture comme le jugement visuel de rimes et la décision lexicale. Le jugement visuel de rimes a des fortes contraintes phonologiques et elle peut nous aider à examiner le traitement phonologique du sourd par rapport à l'entendant. Si les représentations phonologiques du sourd sont généralement moins bien spécifiées que celles de l'entendant (Hanson, 1989), nous nous attendons à trouver des patrons d'activation cérébrale différents entre les sourds et les entendants. Ici, nous souhaitons examiner comment le traitement phonologique erroné qui semble expliquer une bonne partie de la faible performance de la tâche de jugement visuel de rimes (voir analyse 1) peut être spécifié dans le cadre du modèle de lecture à deux voies. D'une part, il se peut que le sourd utilise la voie directe (Harris & Beech, 1998; Waters & Doehring, 1990), ce qui est nécessaire pour accéder à la phonologie du mot irrégulier, mais que le défaut de spécification de la représentation phonologique du sourd acquise généralement avec la lecture labiale limiterait l'accès par cette voie à la forme phonologique adéquate du mot. En effet, nous avons vu dans la partie théorique (cf. A.3) que les sourds confondent souvent des phonèmes qui ne peuvent pas être distingués sur la seule base des mouvements labiaux. Plus encore, le sourd aurait une difficulté particulière pour spécifier phonologiquement la partie finale du mot (i.e. la rime) (Sterne & Goswami, 2000 ; Expérience 3). Cette inexactitude dans l'accès à la représentation phonologique du mot pourrait être à l'origine des erreurs de jugement visuel de rimes. D'autre part, il se peut que le sourd utilise de manière préférentielle la voie phonologique, ce qui provoquerait un traitement phonologique erroné des mots irréguliers mais non des mots réguliers. Cette dernière hypothèse reste cohérente avec les bonnes performances des conditions consistantes (composées essentiellement de mots réguliers) et les faibles performances des conditions inconsistantes (qui contiennent une bonne quantité des mots irréguliers). Afin de distinguer ces deux possibilités, nous examinons quel réseau

d'activation est plus activé pendant la réalisation de la tâche de rimes : celui de la voie phonologique ou celui de la voie orthographique ?

La deuxième tâche est la décision lexicale qui consiste à discriminer les mots des pseudomots et nous permet d'examiner à travers quelle voie se produit l'accès à la lecture du mot. En effet, au début de l'apprentissage, lorsque les mots sont inconnus ou peu connus, c'est la voie indirecte qui va être utilisée massivement et au fur et à mesure que les mots deviennent plus fréquents, le sujet va s'appuyer plus sur la voie directe (cf. A 4.2). Au moyen de cette tâche, nous cherchons à savoir comment l'équilibre entre les deux voies est organisé chez le sourd. Nous présenterons d'une part des pseudomots qui, par définition, n'appartiennent pas au lexique et ne peuvent donc être traités que par assemblage graphophonologique et d'autre part, des mots réguliers qui peuvent être traités quant à eux par assemblage ou adressage selon la fréquence du mot et la compétence du lecteur. Les études de la tâche de décision lexicale en imagerie cérébrale ont souvent montré chez l'entendant que l'utilisation de la voie directe (que ce soit à travers la sémantique ou non) pour la reconnaissance des mots était liée à l'expertise (i.e. à la fréquence du mot) (Fiebach *et al.*, 2002; Haist *et al.*, 2001; Price *et al.*, 1994; Pugh *et al.*, 1997; Rumsey, Horwitz *et al.*, 1997; Rumsey, Nace *et al.*, 1997). Ainsi, si le sourd, qui n'est pas un lecteur expert, active plus les régions liées au traitement par la voie directe pour écarter les pseudomots et traiter les mots réguliers, nous nous trouverions face à un fonctionnement idiosyncrasique. En revanche, si le sourd utilisait plus la voie phonologique, cela serait en accord avec les données comportementales d'un lecteur entendant en difficulté (Waters & Seidenberg, 1985; Waters *et al.*, 1984). En outre, si nous considérons qu'une plus grande utilisation de la voie phonologique chez le sourd est caractéristique d'un mauvais lecteur, nous devrions aussi observer chez le sourd des activations moins latéralisées (i.e. activation dans l'hémisphère droit) et éventuellement dans le CpFM, associé à l'effort et à la difficulté de la tâche.

*La décision lexicale active aussi la représentation phonologique du mot*

Le jugement de la rime est une tâche qui est phonologiquement contrainte et elle force à l'utilisation de la voie directe si le sujet veut acquérir la représentation phonologique correcte

d'une bonne partie des mots, notamment de ceux qui appartiennent aux conditions inconsistantes. La décision lexicale n'a pas cette contrainte et devrait moins solliciter le traitement phonologique. Cependant, une précision s'impose. Il existe une tendance à penser que la décision lexicale, qui consiste à faire la reconnaissance de la lexicalité d'un item afin de pouvoir discriminer des mots de pseudomots, pourrait contourner tout traitement phonologique et se faire seulement à travers une reconnaissance orthographique. Mais la phonologie est impliquée dans le processus de lecture du mot, que ce soit plus ou moins conscient lorsqu'un système d'assemblage est utilisé (voie phonologique) ou automatique lorsqu'un système d'adressage est choisi (voie orthographique). Nous l'avons déjà dit, les noms des voies (orthographique et phonologique) font référence à la procédure de base utilisée et non à l'ensemble de traitements qui ont lieu (voir modèle de Coltheart ; figure 1 ; p. 30).

### **B.1.3.2 Méthodes d'analyse**

La technique d'imagerie cérébrale utilisée ici est l'Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf). Comme cela a été décrit dans la présentation de l'expérience, le protocole d'activation en IRMf est un protocole en bloc, ce qui ne nous permet pas de discriminer les différentes conditions de la rime (RH, NRH, RNH et NRNH) ou de la décision lexicale (mots et pseudomots) car l'activation obtenue dans les blocs correspond à l'ensemble des conditions.

Dans cette section, nous nous limitons à décrire les sujets, le protocole des tâches ainsi que les paramètres des images appliqués et l'analyse des données effectuée sur les deux tâches, afin de permettre sa reproduction et/ou sa comparaison avec d'autres études. Pour une description du principe de l'IRMf voir Mazoyer (2001).

#### **B.1.3.2.1 Sujets**

Cinq sujets (quatre entendants et un sourd) ont été éliminés de l'échantillon décrit précédemment en raison de la perte de données brutes d'activation correspondant à quelques images de certains sujets. Par conséquent, l'échantillon de cette analyse est réduit à vingt-quatre sujets. Le groupe de sourds et d'entendants était composé de 12 sujets chacun. Les deux groupes restaient appariés au niveau de l'âge, avec une moyenne de 33 ans et 2 mois (23-43 ans) pour le groupe de sourds et de 33 ans et 7 mois (20-49 ans) pour le groupe des entendants ainsi qu'au niveau du genre (6 hommes et 6 femmes dans chaque

groupe). Les deux groupes avaient une durée de scolarité similaire ( $t = 0.39$  ;  $p = 0.7$ ). Le niveau de lecture correspondait à un âge de lecture moyen de 12 ans et 8 mois (11-13 ans) chez l'entendant et de 11 ans et 3 mois chez le sourd (9-13 ans) ( $t = 2.7$  ;  $p < 0.05$ ). Les deux groupes avaient des performances semblables dans le test D2000, qui mesure l'efficacité cognitive générale ( $t = 1.27$  ;  $p = 0.22$ ) (Rennes & Kourowski, 2000).

#### **B.1.3.2.2 Paramètres d'acquisition des images et analyse de données**

Les images ont été acquises dans un appareil de 2 Tesla S200 du système MRI Bruker (Bruker Medical GMBH, Etlingen, Allemagne), équipé avec une bobine de gradient SK330. Les images en IRMf ont été obtenues en utilisant l'imagerie écho-planar (EPI) et une orientation de coupes du type intercommissural AC-PC (32 coupes ; taille de la matrice = 64 x 64 pixels ; taille du voxel = 4 x 4 x 4 mm ; TE = 43 ms). Le temps de répétition (la période des scans) était fixé à 5 secs pour la tâche de décision lexicale et à 6 secs pour la tâche de jugement visuel de rimes. Dans chaque session, un total de 163 volumes sensibles au niveau d'oxygénation du sang (BOLD) a été acquis avec une séquence écho-gradient du type T2\*. La localisation anatomique était obtenue avec des images de spin rapide, qui avait une résolution de 2 x 2 x 2 mm.

##### **B.1.3.2.2.1 Analyse du cerveau entier**

Les données en IRMf ont été analysées au moyen du logiciel « Statistical Parametric Mapping » (SPM 99) avec un prétraitement des images avant de passer au calcul statistique (Friston *et al.*, 1995). Les trois premiers volumes qui correspondent à la présentation à l'écran d'une croix blanche avec l'objectif d'atteindre l'équilibre du signal, étaient éliminés de l'analyse (voir figure 4 ; p. 69). Les images EPI ont été recalées (Woods, Cherry, & Mazziotta, 1992), normalisées spatialement dans des coordonnées standard (Woods, Dapretto, Sicotte, Toga, & Mazziotta, 1999) et lissées spatialement par application d'un filtre Gaussien de 8 mm de largeur à la moitié du pic maximum. Les composantes de basse fréquence étaient éliminées au moyen d'un filtre de haute fréquence avec un seuil de 0.00757 Hz (période de 132 secs). Dans les deux paradigmes, les deux conditions

(expérimentale et contrôle) ont été modélisées comme fonctions carrées (box car) avec une convolution de la réponse hémodynamique. Les inférences statistiques ont été réalisées à travers la théorie du champ gaussien afin de pouvoir corriger pour les comparaisons multiples (Worsley, Poline, Friston, & Evans, 1997). La localisation anatomique des pics d'activation et clusters a été effectuée en référence à l'espace MNI (*Montreal Neurological Institute*) (Evans *et al.*, 1992)

Les différences entre les conditions expérimentales et contrôle ont été évaluées selon le modèle linéaire général, ce qui donne des statistiques t pour chaque voxel. Dans une analyse de premier niveau, nous avons d'abord calculé pour chaque individu des images estimées sur la différence d'activation entre la condition expérimentale et contrôle pour le cerveau entier. Ensuite, dans une analyse en effets aléatoires de deuxième niveau, les paramètres des images estimées de chaque individu ont été entrés dans une analyse statistique afin de pouvoir généraliser les résultats à la population en tenant en compte de la variance inter-sujet. Cette analyse a été réalisée à travers un test t à un échantillon (« one sample t-test ») portant sur les cartes individuelles qui a comparé chaque voxel des participants afin d'examiner l'homogénéité des effets d'activation pour chaque groupe (entendants et sourds). Ainsi, quatre tests t à un échantillon (deux contrastes par groupe) ont été effectués. Les résultats indiqués pour ces quatre tests correspondent aux aires significatives à  $p < 0.001$  (non corrigé) au niveau du voxel. Comme il est mentionné dans les tableaux 4 (jugement visuel de rimes) et 7 (décision lexicale), ces aires étaient aussi significatives à  $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$  ou  $p < 0.001$  corrigé au niveau du cluster pour les comparaisons multiples. L'étendue minimale pour les clusters (k) était fixée à 100 voxels.

En ce qui concerne les comparaisons entre groupes, notre objectif était de comparer l'activation cérébrale dans les régions d'intérêt (RDI) définies *a priori*. Néanmoins, il nous a semblé intéressant aussi de montrer les aires significatives à partir de l'analyse de cerveau entier. A cette fin, un test t à deux échantillons (« two sample t-test) entre entendants et sourds a été réalisé pour la décision lexicale tandis que, pour le jugement visuel de rimes, la

différence de performance entre groupes, étant significative, elle a été introduite comme covariée dans une Analyse de Covariance (ANCOVA) Comme ces analyses n'ont montré aucune activation à  $p < 0.05$  corrigé pour les comparaisons multiples (ni au niveau du voxel, ni du cluster), nous avons signalé seulement les résultats à  $p < 0.001$  non corrigé. L'étendue minimale pour les clusters (k) était fixée à 20 voxels.

#### ***B.1.3.2.2 Analyse en régions d'intérêt***

Comme nous l'avons dit, les régions d'intérêt (RDI) ont été définies *a priori* à partir des données apportées par d'autres études sur l'implication du GFI gauche et droit, les régions occipito-temporales et les régions temporo-pariétales dans la lecture et le traitement phonologique ainsi que le CpFM dans la réponse conflictuelle et l'effort cognitif. Les 12 RDI sont représentées dans la figure 10 (p. 88) et décrites dans le tableau 2.



**Tableau 2**

Liste et coordonnées spatiales des RDI définies *a priori* pour l'analyse d'activation entre groupes pour les tâches de jugement visuel de rimes et décision lexicale visuelle.

Région du circuit de lecture	Réf	RDI	Centre (mm)			Rayon (mm)	Voie	
			x	y	z		direct	indirect
Gyrus frontal inférieur gauche	1	AB 44 gauche	Aires de Brodmann					X
	2	AB 45 gauche					X	
Région occipito-temporale	3	Aire temporo-basale	-48	-41	-16	5	X	
	4	Jonction occipito-temporale	-44	-58	-15	5	X	X
Région temporo-parietale	5	GTS	-53	-13	0	6		X
	6	GTM	-63	-30	4	6		X
	7	GTS postérieur	-37	-35	12	7		X
	8	GTM postérieur	-49	-54	13	6	X	
	9	Lobe pariétal inférieur	Aire anatomique					
Cortex pre-frontal median	10	CpFM	1	17	43	12		
Gyrus frontal inférieur droit	11	AB 44 droit	Aires de Brodmann					
	12	AB 45 droit						

Les aires de Brodmann 44 et 45 correspondent à la totalité de l'aire histologique du cerveau MNI (« Montreal Neurological Institute »). Le lobe pariétal inférieur correspond à la région anatomique. Toutes les coordonnées des centres des sphères sont dans l'espace MNI. Les deux dernières colonnes lient chaque RDI à une des deux voies de lecture. Les AB 44 et 45 et le cortex préfrontal médial (CpFM) ne sont pas pertinentes au modèle de lecture à deux voies.

Dans le GFI gauche, nous avons distingué deux RDI qui correspondent aux régions histologiques des aires de Brodmann 44 et 45. Elles ont été construites à partir du template de Brodmann fourni par le logiciel MRIcro (Rorden & Brett, 2000). Dans la région occipito-

temporale, deux RDI ont été créées à partir des données rapportées dans la méta-analyse de 35 études de la neuroanatomie fonctionnelle de la lecture de Jobard *et al.* (2003). La première RDI était placée à la jonction occipito-temporale et définie comme une sphère dont le centre était la moyenne de 27 pics d'activation ( $x = -44$ ,  $y = -58$ ,  $z = -15$  ; coordonnées MNI) et le rayon la déviation standard des distances entre les pics ( $r = 5$  mm) (Jobard *et al.*, 2003). La deuxième RDI, localisée dans l'aire temporale basale dont le centre est la moyenne de 14 pics d'activation ( $x = -48$ ,  $y = -41$ ,  $z = -16$  ; coordonnées MNI) et le rayon la déviation standard des distances entre les pics ( $r = 5$  mm) (voir tableau 2). Dans la région temporo-pariétale, cinq RDI ont été définies. Quatre de ces RDI se situent dans le lobe temporal supérieur et moyen et ont été créées à partir de la méta-analyse de Jobard *et al.* (2003). De façon similaire aux deux RDI de la région occipito-temporale, les quatre RDI de la région temporale étaient des sphères dont le centre était déterminé à partir de la moyenne des pics d'activation de plusieurs études et le rayon était la déviation standard entre les distances entre les pics (voir table 2 pour les centres et rayons de chaque RDI). La cinquième RDI de la région temporo-pariétal est le lobe pariétal inférieur. Cette RDI correspond à la région anatomique et a été prise de la liste de RDI proposée par l'outil Marsbar de SPM (Brett, Anton, Valabregue, & Poline, 2002; Tzourio-Mazoyer *et al.*, 2002). Enfin, la RDI autour du CpFM était une sphère avec le même centre et rayon calculée dans une méta-analyse de 70 études sur le conflit et l'effort cognitive (Ridderinkhof *et al.*, 2004).

Dans chaque RDI, nous avons calculé pour les deux tâches la moyenne du changement du signal (en pourcentage) de chaque groupe à l'aide de l'outil Marsbar (Brett *et al.*, 2002). A cause de l'absence d'homocédasticité de plusieurs de ces valeurs (ratio de variance  $F$ ,  $p < 0.05$ ), nous avons réalisé un test non paramétrique de Mann-Whitney pour déterminer si l'amplitude du signal était significativement différente entre les groupes (seuil,  $p < 0.05$ ).

En relation avec la tâche de jugement visuel de rimes, une ANCOVA a été aussi réalisée pour chaque RDI afin de vérifier si les différences de performance entre entendants et sourds devaient être prises en compte pour les comparaisons entre groupes au niveau de

l'activation (seuil à  $p < 0.05$ ). Le vecteur de covariance était composé par la performance de chaque sujet.

### B.1.3.3 Résultats

#### B.1.3.3.1 *Tâche de jugement visuel de rimes*

Le tableau 3 présente les performances et les temps de réponses moyens des deux groupes dans la tâche de jugement visuel de rimes et la tâche contrôle en IRMf. La seule différence entre les deux groupes se trouve dans la performance du jugement visuel de rimes ( $p < 0.001$ ) (Tableau 3)

**Tableau 3**

Moyennes de la performance et du temps de réponse au jugement visuel de rimes et au jugement de similarité de consonnes chez les entendants et les sourds

	Entendant	Sourd	p
<b>Jugement visuel de rimes</b>			
▪ Réponses correctes (%)	88.5 (8.6)	72.6 (9.2)	<0.001
▪ Temps de réponse (ms)	1284 (324)	1343 (223)	n.s.
<b>Jugement de similarité de consonnes</b>			
▪ Réponses correctes (%)	88.7 (9.2)	94.8 (3.6)	n.s.
▪ Temps de réponse (ms)	1244 (259)	1249 (188)	n.s.

Les écart types sont entre parenthèses. Les valeurs bilatérales de p sont calculées à partir de l'hypothèse nulle qui stipule que les performances des deux groupes (entendants et sourds) sont égales.

n.s. = non significative avec un seuil de 0.05

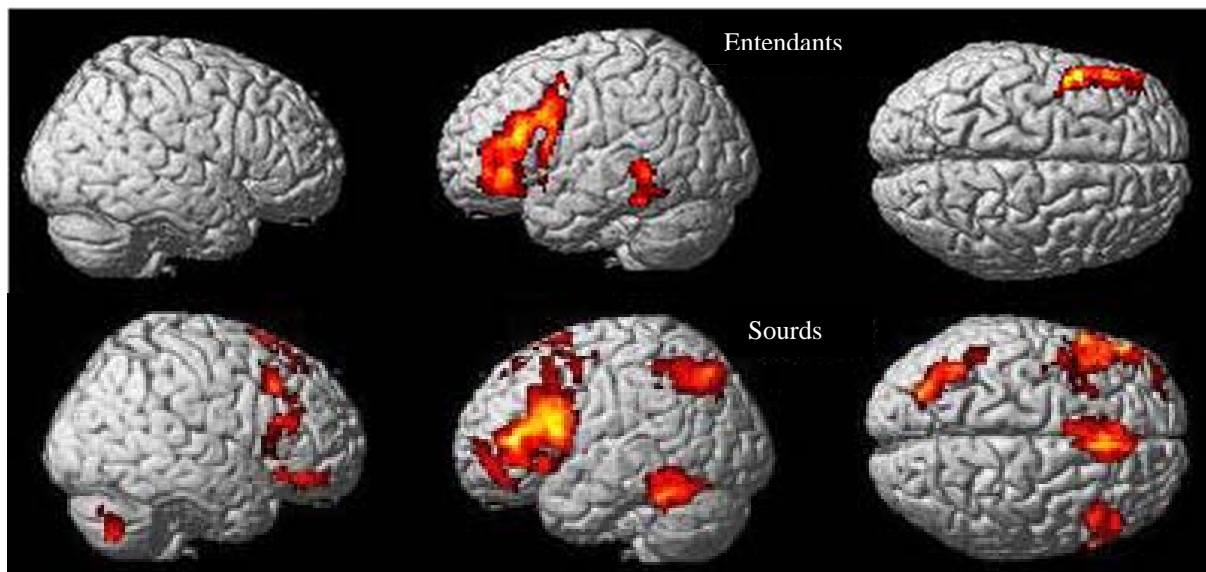
#### B.1.3.3.1.1 Analyse du cerveau entier chez les sourds et les entendants

Les aires avec une activation significative ont été identifiées pour la tâche de jugement de rimes en contraste avec la tâche contrôle. Ces aires correspondent à l'activité globale de la tâche (toutes les conditions confondues). En effet, le paradigme en bloc ne nous a pas permis de calculer séparément l'activation des différentes conditions à l'intérieur de la tâche

de jugement visuel de rimes (i.e. RH, NRNH, RNH et NRH). Les aires activées sont présentées dans la figure 12 et répertoriées dans le tableau 4.

La carte statistique d'activation du cerveau a permis d'identifier chez l'entendant deux régions corticales de l'hémisphère gauche ; une première région assez large sur le GFI gauche dont une grande partie de l'activation est localisée dans les AB 44 et 45 et une deuxième région, située dans la partie postérieure du cerveau, qui implique le GTM postérieur gauche (AB 22/21), la jonction occipito-temporale gauche (AB 37) et l'aire temporale basale gauche (AB 20/37).

Le groupe des sourds a activé un réseau cortical plus étendu comparé aux entendants. Nous avons observé d'abord une activation dans une région très étendue du GFI gauche (essentiellement l'AB 44 et 45 mais aussi l'AB 47 et l'insula, AB 48) et deux régions dans le GFI droit : l'une située dans l'AB 44 et 45 et l'autre dans l'AB 47. Une autre activation assez étendue couvre le lobe pariétal inférieur gauche (AB 7, 39 et 40). Des activations significatives ont aussi été trouvées dans la jonction occipito-temporale gauche (AB 37/19), dans l'aire temporo basale gauche (AB 20/37) et dans le cortex préfrontal médial autour des AB 8, 32 and 16. Enfin, un cluster a été identifié dans le cervelet droit (figure 12 et tableau 4).



**Figure 12** Aires corticales activées pendant la réalisation du jugement visuel de rimes (contrasté avec le jugement visuel de similarité de consonnes) chez les entendants et les sourds. Les cartes statistiques d'activation ont été acquises à partir d'une analyse en effets aléatoires des contrastes individuels pour chaque groupe (n = 12). Les activations étaient significatives après une analyse non corrigée à  $p < 0.001$  au niveau du voxel. Elles étaient aussi significatives après une correction au niveau du cluster (comparaisons multiples) à  $p < 0.001$ . L'extension minimale acceptée était de  $k = 100$  voxels.

**Tableau 4**

Analyse complète du cerveau - Régions cérébrales activées de façon significative dans chaque groupe pendant le jugement visuel de rimes par rapport au jugement visuel de similarité de consonnes.

Région cérébrale	Activation significative (p<0.001)											
	Entendant						Sourd					
	AB	voxels	x	y	z	t	AB	voxels	x	y	z	t
Gyrus frontal inférieur G + insula	<b>45/44</b> 47/48/6	2516	-48	6	24	10.16	<b>45/44</b> 47/48/6	3927	-48	38	10	13.94
Gyrus frontal inférieur D							44/45	581	64	20	16	8.58
Gyrus frontal inférieur D							47	269	52	26	-12	7.18
Cortex préfrontal médial (CpFM)							8/6/32	1538	10	26	48	8.01
Gyrus temporal postérieur G + jonction occipito-temporal G + aire temporale basale G	22/21 20/37	330	-56	-46	-4	9.51						
Jonction occipito-temporale G + aire temporale basale G							20/37/19	843	-48	-56	-24	8.68
Aire occipito-parietale G							39/40/7	1306	-26	-66	42	10.45
Cervelet D								625	26	-68	-36	8.46

Toutes les régions étaient significatives pour une analyse non corrigée à  $p < 0.001$  au niveau du voxel. Elles étaient aussi significatives à  $p < 0.001$  après avoir fait une correction de comparaisons multiples au niveau de cluster. L'extension minimale des clusters était de  $k = 100$  voxels

AB: Aires Brodmann. Les coordonnées (x, y, z) correspondent à la valeur d'activation maximale dans le cluster prenant comme référence le « cerveau standard de l'institut neurologique de Montréal » (système MNI).

G (gauche); D (droite)

#### **B.1.3.3.1.2 Analyse de contraste entre groupes**

##### *B.1.3.3.1.2.1 Analyse du cerveau entier*

L'ANCOVA non corrigée à  $p < 0.001$  pour tout le cerveau a montré chez l'entendant une plus grande activation dans la partie orbitale du gyrus frontal moyen (AB 11), le gyrus supramarginal droit (AB 2), le gyrus précentral (AB 4), le gyrus occipital autour de la scissure

calcarine (AB 18) et le gyrus lingual (AB 17) gauche. Chez le sourd, les activations apparaissent plus fortes dans le GFI à gauche (AB 44) et à droite (AB 44/45), l'aire motrice supplémentaire (AB 32), le lobe pariétal gauche (AB 7) et dans la partie moyenne du gyrus occipital droit (AB 7/19) et supérieure (AB 19) (Tableau 5). Aucune différence significative entre groupes n'a été trouvée après correction en comparaisons multiples (que ce soit au niveau du voxel ou du cluster).

**Tableau 5**

Régions cérébrales significativement plus activées dans un groupe par rapport à l'autre pendant le jugement visuel de rimes (Analyse complète du cerveau (ANCOVA)).

Région cérébrale	Activation significative (p<0.001) – ANCOVA											
	entendant > sourd						sourd > entendant					
	AB	voxels	x	y	z	t	AB	Voxels	x	y	z	t
Gyrus frontal moyen orbital	11	34	-4	38	-10	4.86						
Gyrus frontal inférieur G							44	13	-48	8	24	4.48
Gyrus frontal inférieur D							44/45	35	58	26	20	4.43
Lobe pariétal inférieur G							7	50	-26	64	43	4.67
Gyrus supramarginal D	2	12	66	-22	34	3.92						
Aire motrice supplémentaire							32	15	10	24	46	3.79
Gyrus précentral D	4	12	12	-26	74	4.05						
	4	12	26	-26	74	3.73						
Gyrus occipital moyen D							19	35	30	-78	28	4.62
							7	23	32	-70	40	3.83
Gyrus occipital supérieur D							19	33	28	-64	-32	4.39
Gyrus occipital (calcarine)	18	23	2	-92	10	4.48						
Gyrus lingual G	17	36	8	-76	-2	4.21						

Toutes les régions signalées ici étaient significatives pour une analyse non corrigée à  $p < 0.001$  au niveau du voxel. L'extension minimale des clusters est de  $k = 10$  voxels

AB: Aires Brodmann. Les coordonnées (x, y, z) correspondent à la valeur d'activation maximale dans le cluster prenant comme référence le « cerveau standard de l'institut neurologique de Montréal » (système MNI).

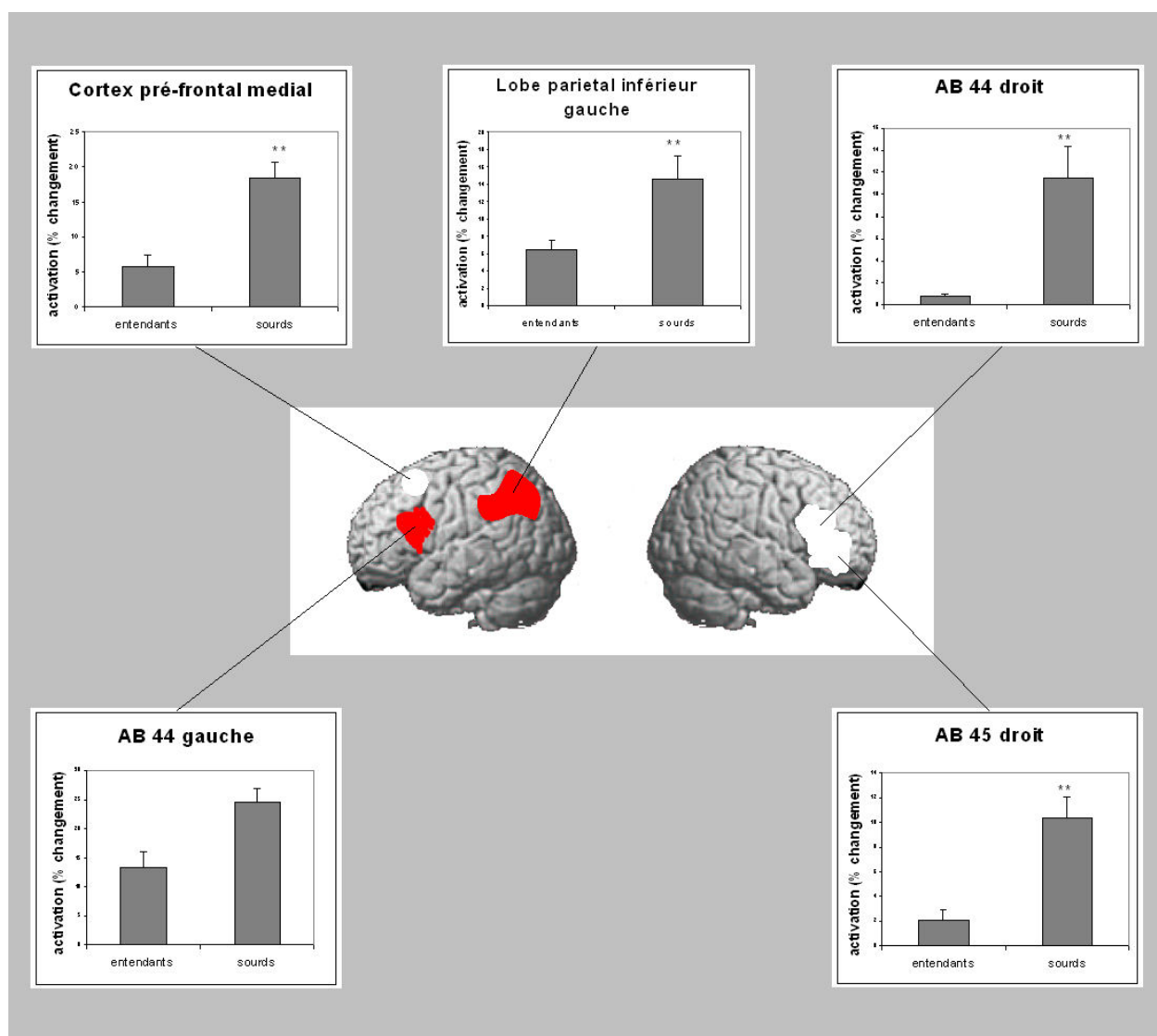
G (gauche); D (droite)

#### B.1.3.3.1.2.2 Analyse en régions d'intérêt

L'ANCOVA réalisée pour chaque RDI montrant que la performance n'était pas un facteur significatif, nous avons utilisé le test non paramétrique de Mann-Whitney (du fait de la non-homocédasticité) pour comparer les niveaux d'activation des RDI dans les deux groupes. Le groupe de sourds a montré une activation plus grande dans le GFI gauche (AB 44), le GFI



droit (AB 44 et 45), le lobe pariétal inférieur gauche et le cortex préfrontal médial (AB 6/8/32). Le groupe entendant n'a pas montré d'activation significativement plus grande que le sourd dans aucune de RDI (figure 13).



**Figure 13** Régions d'intérêt dans lesquelles les entendants et sourds manifestent un niveau d'activation significativement différent lors du jugement visuel de rimes. Les graphiques montrent le pourcentage de variation du signal dans l'activation des cinq RDI qui possèdent une différence significative entre entendants et sourds (\* $p < 0.05$  ; \*\* $p < 0.01$ ). Les valeurs des histogrammes représentent la variation moyenne du pourcentage du signal d'activation pour chaque groupe. Les barres d'erreurs correspondent à la déviation standard.

### B.1.3.3.2 *Décision lexicale*

Le tableau 6 montre la performance et le temps de réponses correctes moyens de la tâche de décision lexicale visuelle et la tâche contrôle de détection visuelle dans les deux groupes

**Tableau 6**

Moyennes de la performance et du temps de réponse à la tâche de décision lexicale et de jugement visuel de symboles chez les entendants et les sourds.

	Entendant	Sourd	p
<b>Tâche de décision lexicale</b>			
▪ Réponses correctes (%)	94 (5.6)	94.8 (3.4)	n.s.
▪ Temps de réponse (ms)	884 (182)	967 (155)	n.s.
<b>Tâche de détection visuelle</b>			
▪ Réponses correctes (%)	96.3 (3.8)	98.2 (2.0)	n.s.
▪ Temps de réponse (ms)	848 (201)	929 (115)	n.s.

Les déviations standard sont entre parenthèses. Les valeurs bilatérales de p sont calculées à partir de l'hypothèse nulle qui stipule que les performances des deux groupes (entendants et sourds) sont égales.

n.s. = non significative avec un seuil de 0.05

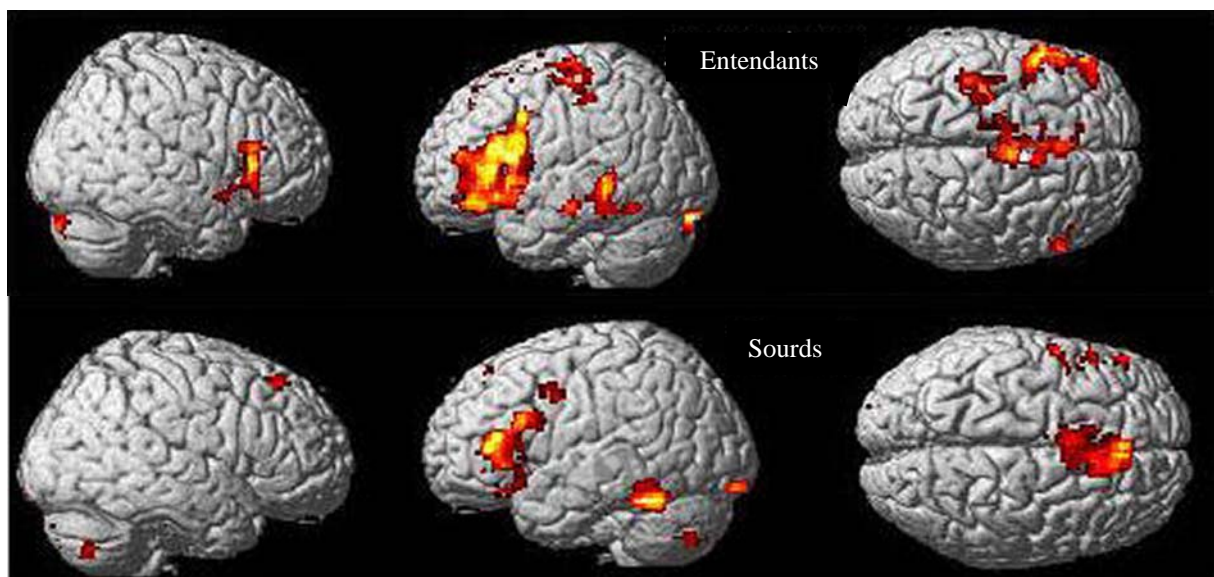
Les aires avec une activation significative ont été identifiées pour la tâche expérimentale (i.e. décision lexicale) par rapport à la tâche contrôle (i.e. jugement visuel de symboles). Comme dans la tâche de jugement visuel de rimes, les aires montrées ici correspondent à l'activité globale de la tâche (toutes les conditions confondues) car le paradigme en bloc ne permet pas de discriminer l'activation des différentes conditions (i.e. mots et pseudomots). Les aires activées sont montrées dans la figure 14 et le tableau 7.

#### **B.1.3.3.2.1 Analyse du cerveau entier chez les sourds et les entendants**

Chez l'entendant, la tâche de décision lexicale activait de manière significative un réseau très étendue comportant le GFI gauche qui comprend les AB 44, 45, 47 et l'insula (AB 48), le cortex frontal médian postérieur (AB 6/8/32), le gyrus précentral (AB 3/4/6) et le GFI droit (AB 45/47). Dans la partie postérieure du cerveau, une activation significative a été trouvée

dans le gyrus temporal moyen-supérieur gauche (AB 21/22), l'aire temporale basale gauche (AB 37/20), la jonction occipito-temporale gauche (AB 37) ainsi que dans l'aire péristriée gauche (AB 18). Une activation significative a aussi été trouvée dans le gyrus temporal inférieur-moyen gauche (AB 20/21) et dans le cervelet droit.

Le sourd montre une activation significative dans le GFI gauche (AB 44/45), l'insula (AB 48) et le cortex préfrontal médial (autour de l'aire motrice supplémentaire, AB 6/8) ainsi que dans le cortex cingulaire antérieur (AB 32). Une activation significative a été aussi trouvée dans la partie interne de l'aire préfrontale droite (AB 25), la jonction occipito-temporale gauche (AB 37), l'aire temporale basale gauche (AB 20/37) et l'aire péristriée gauche (AB 18). Enfin, trois clusters ont été trouvés dans le cervelet : un dans l'hémisphère gauche et deux dans l'hémisphère droit (figure 14 et tableau 7).



**Figure 14** Aires corticales activées pendant la réalisation de la tâche de décision lexicale (contrasté avec le jugement visuel de symboles) chez les entendants et les sourds. Les cartes statistiques d'activation ont été acquises à partir d'une analyse en effets aléatoires des contrastes individuels pour chaque groupe ( $n = 12$ ) et elles ont été corrigées au niveau de cluster (comparaisons multiples) à  $p < 0.05$  avec une extension minimale de 100 voxels.

**Tableau 7**

Régions cérébrales activées de façon significative dans chaque groupe pendant la décision lexicale par rapport au jugement visuel de symboles (Analyse complète du cerveau).

Région cérébrale – cluster	Activation significative (p<0.001)											
	Entendant						Sourd					
	AB	Voxels	x	y	z	t	AB	voxels	x	y	z	t
Gyrus frontal inférieur G + insula	44/45/47/48	3287	-52	20	18	8.77***	44/45/48	1561	-46	36	6	12.60***
Gyrus frontal inférieur D	45/47	468	44	26	6	9.58***						
Gyrus frontal inférieur D (médián)							25	357	10	12	-4	6.48***
Gyrus précentral G	3/4/6	326	-36	-20	60	7.28***						
Cortex frontal médial postérieur	6/8/32	831	-2	-2	68	6.90***	6/8/32	1227	-6	6	54	10.49***
Cortex cingulaire dorsal antérieure D							32	101	18	32	26	5.81*
Gyrus temporal G	20/21	111	-50	-22	-16	5.73*						
Gyrus temporal postérieur + jonction occipito-temporale + aire temporale basale G	22/21 37/20	464	-62	-42	-2	7.03***						
Jonction occipito-temporale + aire temporale basale G							37/20	472	-44	-50	-24	10.43***
Gyrus occipital G	18	234	-24	-94	-20	9.67***	18	118	-24	-94	-16	
Cervelet D		142	20	-86	30	6.71**		189	14	-78	-42	7.47**
								134	32	-68	-44	6.24*
Cervelet G								141	-30	-72	-46	6.34**

Toutes les régions étaient significatives pour une analyse non corrigée à  $p < 0.001$  au niveau du voxel. Elles étaient aussi significatives à  $***p < 0.001$ ,  $**p < 0.01$  ou  $*p < 0.05$  après avoir fait une correction de comparaisons multiples au niveau de cluster. L'extension minimale des clusters est de  $k = 100$  voxels.

AB: Aires Brodmann. Les coordonnées (x, y, z) correspondent à la valeur d'activation maximale dans le cluster prenant comme référence le « cerveau standard de l'institut neurologique de Montréal » (système MNI).

G (gauche); D (droite)

### ***B.1.3.3.2.2 Analyse de contraste entre groupes***

#### *B.1.3.3.2.2.1 Analyse du cerveau entier*

Les résultats provenant de l'analyse non corrigée à  $p < 0.001$  ont montré une activation plus forte chez l'entendant dans le gyrus temporal moyen gauche (AB 21), le gyrus supramarginal droit, le thalamus et le gyrus de Heschl gauche tandis que l'activation était plus forte chez le sourd dans l'aire motrice supplémentaire et le gyrus cingulaire postérieur droit (tableau 8). Aucune différence significative entre les groupes n'a été trouvée après correction en comparaisons multiples (que ce soit au niveau du voxel ou du cluster).

**Tableau 8**

Régions cérébrales significativement plus activées dans un groupe par rapport à l'autre pendant la tâche de décision lexicale (Analyse complète du cerveau).

Région cérébrale	Activation significative (p<0.001)											
	entendant > sourd						sourd > entendant					
	AB	voxels	x	y	z	t	AB	voxels	x	y	Z	t
Gyrus temporal moyen antérieur D	21	32	62	-6	20	4.58						
Thalamus		16	-4	-14	12	4.45						
Gyrus heschl D		12	-50	14	-10	3.86						
Gyrus supramarginal D	43	15	68	-16	30	4.18						
	43	12	56	-14	30	4.05						
Gyrus frontal supérieur médial (AMS)							8	52	30	28	56	4.45
Gyrus cingulaire postérieur D							29	19	10	-40	16	4.79

Toutes les régions signalées ici étaient significatives pour une analyse non corrigé à  $p < 0.001$  au niveau du voxel. L'extension maximale des clusters est de  $k = 10$  voxels

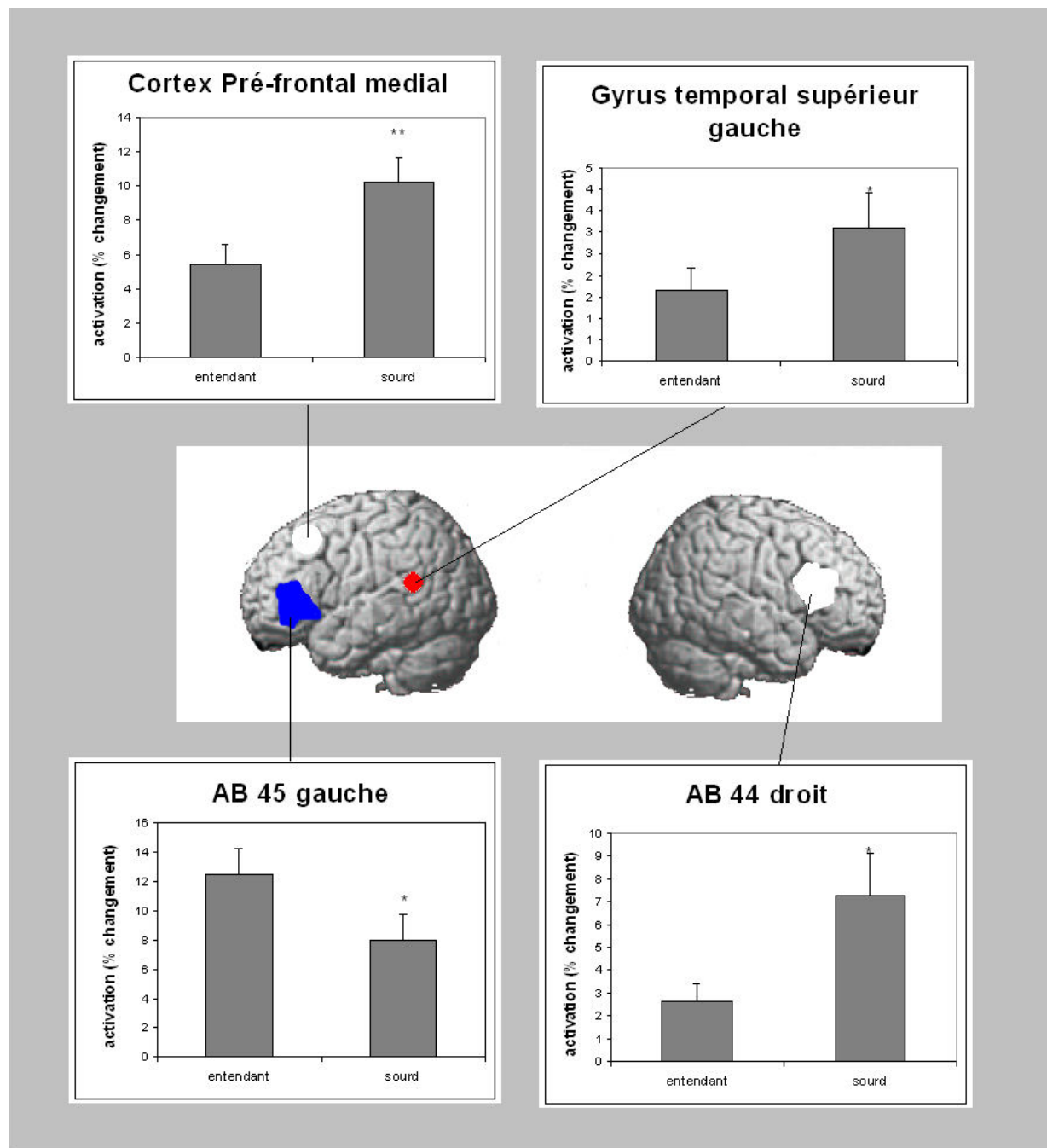
AB: Aires Brodmann. Les coordonnées (x, y, z) correspondent à la valeur d'activation maximale dans le cluster prenant comme référence le « cerveau standard de l'institut neurologique de Montréal » (système MNI).

AMS : aire motrice supplémentaire

G (gauche); D (droite)

#### B.1.3.3.2.2 Analyse en régions d'intérêt

Les deux groupes ont montré des différences significatives que dans 4 de 12 RDI examinées. Le groupe de sourds avait une activation plus forte dans l'AB 44 droite, le gyrus temporal supérieur gauche et le cortex préfrontal médian (AB 6/8/32) tandis que le groupe des entendants activait plus l'AB 45 gauche (figure 15).



**Figure 15** Régions d'intérêt dans lesquelles les entendants et sourds manifestent un niveau d'activation significativement différent lors de la tâche de décision lexicale. Les graphiques montrent le pourcentage de variation du signal dans l'activation des quatre RDI avec une différence significative entre entendants et sourds (\* $p < 0.05$  ; \*\* $p < 0.01$ ). Les valeurs des histogrammes représentent la variation moyenne de pourcentage du signal d'activation pour chaque groupe. Les barres d'erreurs correspondent à la déviation standard.



### **B.1.3.4 Discussion**

Les données de l'étude en IRMf peuvent-elles nous aider à expliquer les erreurs phonologiques des lecteurs sourds identifiées lors de la première analyse ? Cette deuxième analyse nous suggère que les sujets sourds utilisent plus que l'entendant la voie phonologique. Par conséquent, nous pouvons supposer que le sujet a appliqué les règles de conversion graphème-phonème à tous les mots et en particulier aux mots irréguliers dont la forme phonologique ne peut être retrouvée que par recours à la voie directe. En effet, afin de pouvoir adresser correctement la phonologie du mot, le sujet doit avoir au préalable une représentation phonologique du mot qui soit complètement spécifiée. Or, comme nous l'avons vu, sans une stimulation adéquate et précoce (complémentaire à la stimulation labiale), le sourd n'est pas en mesure de construire des représentations phonologiques des mots correctement spécifiées. Cet état des choses peut contraindre le sujet à reconstituer la phonologie du mot par assemblage sur la base de règles apprises (i.e. règles de CGP) lors de l'apprentissage de la lecture et après plusieurs années de pratique de la communication orale. De même, nous savons que la sur-utilisation de la voie phonologique chez l'entendant est caractéristique du mauvais lecteur (Waters & Seidenberg, 1985; Waters *et al.*, 1984).

L'analyse des activations en RDI dans la tâche jugement visuel de rimes montre une plus grande activation chez le sourd dans le lobe pariétal inférieur gauche et le GFI gauche autour de l'AB 44, deux aires réputées liées à la voie phonologique de la lecture. Ces différences d'activation trouvées dans les RDI étudiées ne peuvent pas être expliquées par la performance, d'après l'analyse de covariance. Par conséquent, les différences significatives identifiées reflèteraient plutôt une différence de stratégie cognitive. Premièrement, la partie operculaire du GFI gauche a été associée à la boucle articulatoire dans le processus de lecture ). Cependant, il a été montré que l'activation de l'AB 44 ne se restreindrait pas à l'articulation de la parole mais ferait partie du réseau qui soutient la conversion graphème-phonème au-delà de l'articulation (Fiebach *et al.*, 2002). Plus précisément, le rôle de l'AB 44 au sein du réseau d'activation dédié à la conversion

graphophonologique serait consacré à la correction et la vérification du décodage phonologique (Paulesu *et al.*, 2003). Deuxièmement, le lobe pariétal inférieur a été associé à la conversion graphophonologique et plus particulièrement au transfert intermodal de l'information : entre la modalité visuelle (écrite) et la phonologie (Booth *et al.*, 2002a, b, 2003 ; Paulesu *et al.*, 1993). L'activation plus forte de ces deux aires (AB 44 et lobe pariétal inférieur) chez les personnes sourdes suggère qu'elles utilisent de façon plus importante la voie phonologique.

Les données en IRMf de la décision lexicale attestent aussi une préférence de la voie phonologique de la part du lecteur sourd. En effet, les résultats montrent une activation plus forte chez le sourd dans la partie postérieure de l'hémisphère gauche, dans la RDI située autour du GTS postérieur qui a lui aussi été identifié à la voie phonologique (Jobard *et al.*, 2003). En effet, cette aire est souvent activée dans des tâches phonologiques et son implication ici ferait appel à l'utilisation des correspondances graphème-phonème afin de traiter la prononciation des mots ou des pseudomots (Simos, Fletcher, Foorman *et al.*, 2002). Quant à l'activation plus forte chez l'entendant dans le GFI, dans l'AB 45, il a été montré qu'elle était liée au statut lexical du stimulus (Fiebach *et al.*, 2002).

Dans le modèle de lecture à deux voies, Coltheart *et al.* (1993) envisageaient l'existence d'une troisième voie qui accède à la reconnaissance du mot par la voie directe sans traitement des aspects sémantiques (cf. A 4.1). Une possibilité est que le sourd accède à la voie directe par cette troisième voie car il active moins l'AB 45. Cependant le traitement sémantique du mot implique au moins deux aires. D'une part l'aire temporale basale gauche, qui est associée au traitement sémantique des mots (Thompson-Schill *et al.*, 1999) et plus précisément à l'activation du concept des mots (Nobre *et al.*, 1994). D'autre part, l'AB 45 gauche est associée à un processus de récupération et jugement sémantique (Fiez, 1997; Friederici, Opitz, & von Cramon, 2000; Poldrack *et al.*, 1999) qui pourrait être liée au contrôle des attributs lexicaux (Bookheimer, 2002; Petersen *et al.*, 1988). Plus précisément pour la tâche de décision lexicale, l'activation de l'AB 45 interviendrait dans la recherche contrôlée

d'attributs lexicaux qui peuvent aider à discriminer les mots des pseudomots (Friederici, communication personnelle). Cette ressource (le contrôle d'attributs sémantiques) paraît être plus utilisée par les entendants que par les sourds. Toutefois, nous ne pouvons pas distinguer la totalité de traitements sémantiques entre les deux groupes car la différence d'activation entre les deux groupes ne concerne que l'AB 45 (et non l'aire temporale basale). Il est dès lors permis de penser que l'expertise de l'entendant lui donnerait une plus grande capacité de contrôle des attributs sémantiques, ce qui suggère une plus grande efficacité dans l'utilisation de ces attributs sémantiques pour la reconnaissance du mot. Ceci ne devrait pas nécessairement induire une meilleure utilisation de la voie directe car le sujet a plusieurs alternatives à l'intérieur de cette voie. Cette possibilité sera examinée dans la prochaine étude avec l'analyse des temps de réponse aux mots fréquents, généralement traités via la voie directe (analyse 3)

Notre troisième hypothèse de travail (cf. A.7) selon laquelle le lecteur sourd a une activation cérébrale moins latéralisée, est également confirmée par les données de cette analyse. Cette moindre latéralisation des activations lors des tâches de lecture nous évoque le réseau décrit chez le sujet mauvais lecteur, notamment dans la dyslexie développementale. En effet, nous trouvons des aspects communs entre le sujet entendant dyslexique et le sourd comme l'activation du GFI droit et l'activation du GFI gauche plus élevée par rapport au normo-lecteur). Toutefois, les données montrent aussi une différence importante entre le dyslexique et le sourd qui mérite d'être soulignée et expliquée : le sourd montre une sur activation du lobe pariétal inférieur par rapport au normo-lecteur entendant, ce qui est à l'opposé de l'hypoactivation de la région temporo-pariétale, observée chez les sujets dyslexiques. Cela peut être dû à la différence entre les deux groupes en ce qui concerne l'étiologie des troubles (cf. A.6.1.3). En effet, il a été proposé que l'hypo-activation de la région temporo-pariétale et/ou sa déconnexion avec d'autres régions serait un marqueur neuroanatomofonctionnel caractéristique des dyslexiques lors de la réalisation des tâches phonologiques sur des mots écrits (Paulesu *et al.*, 1996; Rumsey *et al.*, 1992; Rumsey *et al.*,

1999) tandis que la forte activation bilatérale du GFI se produirait afin de créer une compensation du type fonctionnel à l'hypoactivation des régions postérieures (Brunswick, McCrory, Price, Frith, & Frith, 1999; Georgiewa *et al.*, 2002; Pugh *et al.*, 2000; B. A. Shaywitz *et al.*, 2002; S. E. Shaywitz *et al.*, 1998; Simos, Fletcher, Bergman *et al.*, 2002). Plus important, nous pouvons aussi retrouver un patron d'hyperactivation et de moindre latéralisation dans les zones antérieures du cerveau (i.e. autour du GFI) chez des sujets non-dyslexiques mais qui auraient des troubles de langage, comme par exemple chez des patients qui ont subi une lésion cérébrale (Calvert *et al.*, 2000). Par conséquent, il est possible que la suractivation et la moindre latéralisation du GFI soient des aspects communs des différents troubles linguistiques et de lecture (par ex. le sourd, le cérébro-lésé et le dyslexique) et que son rôle de compensation fonctionnelle soit présent avec le but général de surmonter les difficultés phonologiques de la tâche. Autrement dit, cette suractivation du GFI bilatéral ne serait pas spécifique du dyslexique mais elle pourrait se présenter dans d'autres cas chez des sujets en difficulté de lecture, dont le sourd.

Enfin, la forte activation chez le sourd dans le cortex préfrontal médial, qui est liée à la difficulté de la tâche et/ou au contrôle cognitif, paraît confirmer l'idée que le patron fonctionnel de sur-activation que nous venons de discuter et qui est fortement liée à la voie phonologique, reflète des difficultés d'application concernant les tâches de lecture. Dans la prochaine analyse, nous examinerons aussi une éventuelle difficulté dans l'utilisation de la voie phonologique, une caractéristique qui nous retrouvons aussi chez le sujet entendant mauvais lecteur (Backman *et al.*, 1984).

## **B.1.4 Analyse n° 3 : le lecteur sourd, emploie t-il la voie phonologique de façon efficace ?**

### **B.1.4.1 Introduction**

Avec les données de l'IRMf de la décision lexicale, nous avons été en mesure d'évaluer la préférence de la voie phonologique de lecture chez le sourd (analyse 2). Nous proposons maintenant d'examiner l'efficacité dans l'utilisation de cette voie à l'aide de l'analyse de la performance et du temps de réponse de la décision lexicale.

Si le sourd utilise plus la voie phonologique en raison de son faible niveau de lecture, nous pouvons envisager qu'il procède selon un mode de réponse proche de celui d'un mauvais lecteur entendant, qui bien qu'utilisant surtout la conversion graphophonologique (Waters & Seidenberg, 1985; Waters *et al.*, 1984) montrerait une plus grande difficulté dans l'usage des correspondances graphème-phonème (Backman *et al.*, 1984). Cette difficulté se manifesterait par des temps de réponse plus longs en comparaison des normo-lecteurs lorsque le sujet utilise la voie phonologique. En effet, un des résultats le plus robuste distinguant les bons des mauvais lecteurs est le fait que le temps de réponse pour la dénomination des pseudomots est plus long chez les mauvais lecteurs (Perfetti & Hogaboam, 1975; Stanovich, 1982a, 1982b). Nous formulons l'hypothèse que cela serait le même cas pour le sourd (hypothèse de travail n°4; cf. A.7). Autrement dit, le sujet sourd aura un temps de réponse plus long que l'entendant pour l'identification des pseudomots.

Deuxièmement, si nous classons les mots par fréquence et si nous supposons qu'au fur et au mesure que la fréquence diminue, l'intervention de la voie phonologique sera plus importante (Perfetti, 1999), nous pouvons nous attendre à une augmentation du temps de réponse des mots peu fréquents et pseudomots<sup>10</sup> par rapport aux mots très fréquents. C'est ce que nous pouvons appeler l'effet de fréquence (TR pseudomots > TR mots peu fréquents > TR mots très fréquents). Dès lors, nous pouvons émettre l'hypothèse que si le sujet sourd

---

<sup>10</sup> Nous pouvons considérer les pseudomots comme des mots de fréquence 0

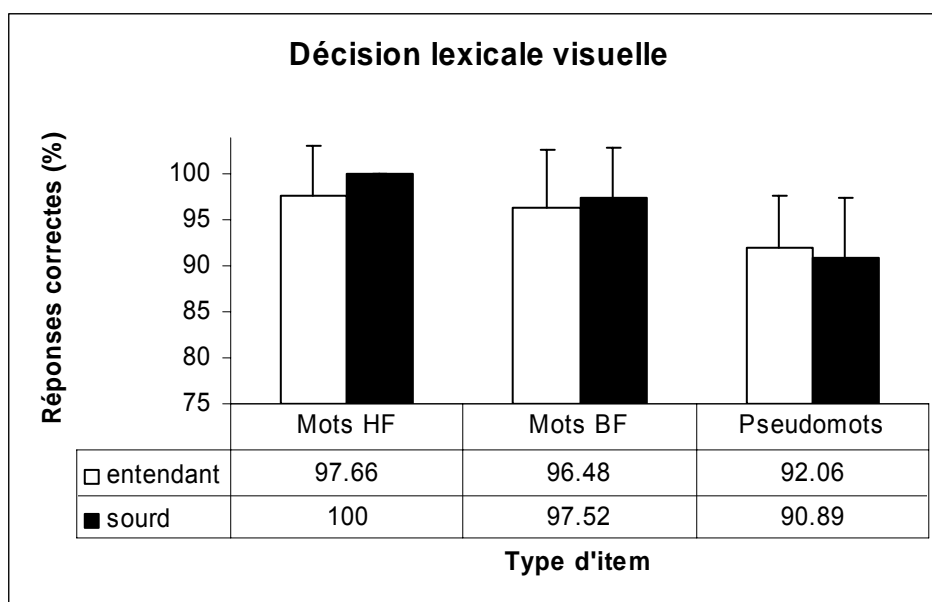
a des difficultés dans l'utilisation de la voie phonologique, il devrait manifester un effet de fréquence plus important que l'entendant.

#### **B.1.4.2 Méthodes de l'analyse**

Afin de réaliser l'analyse sur l'effet de la fréquence lexicale, nous avons considéré un groupe de mots de haute fréquence comprenant les 25 mots les plus fréquents de la liste et un groupe de mots de basse fréquence avec les 25 mots les moins fréquents de la liste (voir liste 2 de l'annexe). Selon l'échelle logarithmique de fréquence (Content *et al.*, 1990), les mots appartenant au groupe de haute fréquence ont une valeur moyenne de 549,92 tandis que les mots appartenant au groupe des mots de basse fréquence ont une valeur de 338,12. La différence de fréquence entre ces deux groupes est significative ( $t = 4.2$ ,  $p < 0.001$ )

#### **B.1.4.3 Résultats**

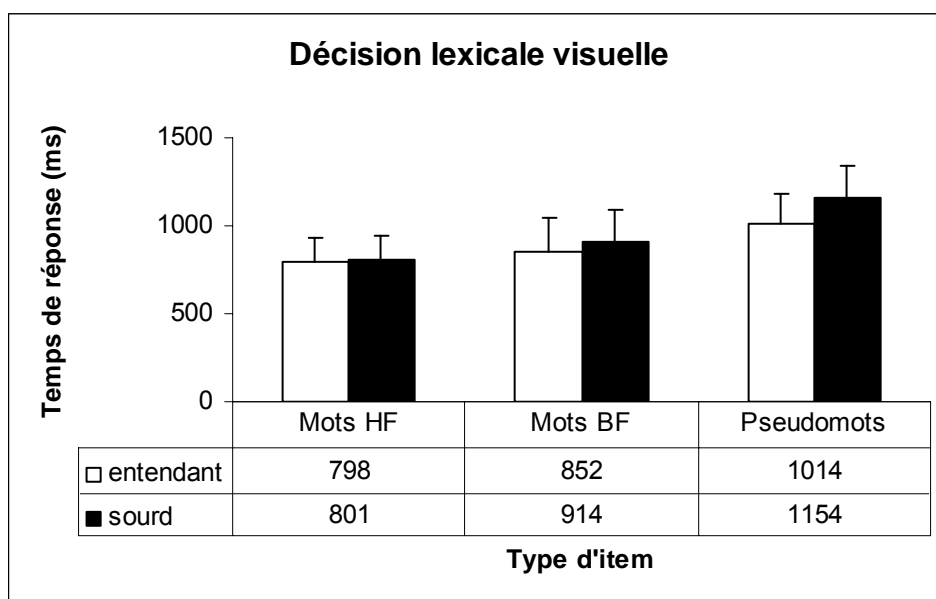
La figure 16 (p. 119) montre la performance de la décision lexicale pour les mots et les pseudomots chez le lecteur entendant et sourd. Ces valeurs ont été introduites dans un analyse de variance 2 (groupe : entendant, sourd) x 3 (fréquence : mots haute fréquence, mots basse fréquence, pseudomots) avec la fréquence comme variable intra-sujet. Les résultats de l'ANOVA montrent un effet principal de la fréquence,  $F(2,54) = 16.15$ ,  $p < 0.001$  mais pas d'effet du groupe,  $F < 1$ , ni d'interaction,  $F < 1$ .



**Figure 16** Pourcentage moyen de réponses correctes à la tâche de décision lexicale visuelle en fonction du type d'item dans les deux groupes (entendants et sourds). Les barres d'erreurs correspondent à la déviation standard.

HF : haute fréquence ; BF : basse fréquence

Les temps de réponse correcte moyens des deux groupes pour les mots et les pseudomots (figure 17) ont été introduits dans une analyse de variance de 2 (groupe : entendant, sourd) x 3 (fréquence : mots haute fréquence, mots basse fréquence, pseudomots) avec la fréquence comme variable intra-sujet. Cette analyse révèle un effet significatif de la fréquence  $F(2,54) = 131, p < 0.001$  ainsi qu'une interaction  $F(2,54) = 7.25, p < 0.01$  mais pas d'effet principal du groupe  $F(1,27) = 1.30, p > 0.2$ . Une analyse post-hoc (Bonferroni-Dunn) établit que les différences au niveau de la fréquence se produisent entre toutes les conditions (pseudomots > mots basse fréquence > mots haute fréquence ;  $p < 0.001$ ). L'interaction entre le groupe et la fréquence indique que l'augmentation du TR avec la diminution de la fréquence est plus élevée chez le sourd que chez l'entendant. Deux tests t supplémentaires entre groupes pour chaque type d'item ont permis de trouver une différence significative pour les pseudomots  $t(27) = 2.07, p < .05$  mais pas pour les mots.



**Figure 17** Temps moyen de réponses correctes à la tâche de décision lexicale visuelle en fonction du type d'item dans les deux groupes (entendants et sourds). Les barres d'erreurs correspondent à la déviation standard.  
HF : haute fréquence ; BF : basse fréquence

#### **B.1.4.4 Discussion**

Des études antérieures ont montré une différence dans le temps de dénomination de pseudomots, très consistante entre les mauvais et les bons lecteurs. Cette différence suggère que les difficultés de lecture de mots des mauvais lecteurs se centrent dans la génération du code phonologique nécessaire pour accéder au lexique (Perfetti & Hogaboam, 1975; Stanovich, 1982a, 1982b). Nous trouvons également une différence dans le TR des pseudomots entre entendants et sourds, bien que la performance entre les deux groupes ne soit pas significativement différente (figures 16 et 17). Nous pouvons en déduire que le sourd, comme le sujet entendant mauvais lecteur, présente une difficulté dans l'usage de règles de CGP.

De plus, il existe une interaction du TR entre les groupes (entendants et sourds) et la fréquence lexicale (haute fréquence, basse fréquence, et pseudomots) provoquée par une différence entre les groupes qui augmente avec la diminution de fréquence (figure 17). En outre, les deux ANOVA complémentaires suggèrent un continuum de cette interaction avec



une plus grande différence (au niveau du TR) entre les groupes dans les mots de basse fréquence que dans les mots de haute fréquence et dans les pseudomots que dans les mots de basse fréquence, ce qui écarte l'idée d'un effet de lexicalité<sup>11</sup>. Les résultats de l'interaction peuvent être expliqués à partir du modèle de lecture à deux voies dans lequel la reconnaissance des mots de haute fréquence serait faite à travers la voie directe et rapide tandis que les mots de basse fréquence et les pseudomots utiliseraient la voie indirecte et lente (Paap & Noel, 1991). Les TR semblables de la décision lexicale sur les mots de haute fréquence chez les entendants et les sourds suggère que les deux groupes utilisent la voie directe avec la même efficacité. En revanche, les TR plus longs chez les sourds pour les pseudomots peuvent signifier une plus grande difficulté dans l'usage de la voie phonologique en comparaison de l'entendant.

Afin d'expliquer cela, il a été observé que les problèmes des mauvais lecteurs avec la voie phonologique peuvent provenir d'une utilisation moins efficace dans les stratégies de recodage phonétique dans la mémoire du travail (Torgesen, 1977a; Torgesen & Houck, 1980) (cf. A.2). Par exemple, dans une tâche de mémoire de chiffres, les mauvais lecteurs ne feraient pas une « préparation » dans des petits groupes d'items comme les bons lecteurs. Par conséquent, le retard trouvé dans la voie phonologique pourrait être lié aux difficultés d'une utilisation efficace des stratégies de recodage phonétique et/ou articulatoire. Cette idée peut être corroborée par l'activation cérébrale obtenue à partir des deux tâches. D'un côté, nous observons une activation bilatérale du GFI comparable à celle qui est observée pendant la récupération des lésions frontales (par ex. celles qui provoquent une aphasie), et qui est interprétée comme une compensation des fonctions de l'hémisphère gauche, affectées par la lésion (Calvert *et al.*, 2000). L'activation du GFI droit pourrait être donc le signe d'une basse efficacité. Nous pouvons donc suggérer que la forte activation du GFI dans l'hémisphère droit chez le lecteur sourd serait impliquée dans l'assistance du traitement cognitif (i.e. conversion graphème-phonème avec recodage phonologique et/ou

---

<sup>11</sup> En outre, la performance était similaire pour les deux groupes indépendamment de la fréquence (figure 16), ce qui suggère que les items de cette tâche étaient également accessibles à leur reconnaissance par entendants et sourds.

articulation de la parole) afin de surmonter les limitations fonctionnelles que l'hémisphère gauche pourrait présenter dans ses fonctions : articulation de la parole et application de règles de CGP. D'un autre côté, les sujets sourds ont aussi montré, dans les deux tâches, une activation plus importante dans le CpFM, autour de l'aire motrice supplémentaire (AMS) et le cortex cingulaire antérieur dorsal. L'activation de cette région est associée à un plus grand effort cognitif mais aussi à l'incertitude de la réponse, le conflit et/ou la difficulté provoquée par la tâche (Ridderinkhof *et al.*, 2004). Dans le cas des sourds, il est possible que cette aire s'active du fait de l'effort lié à l'articulation et à la difficulté de l'application des règles graphophonologiques.

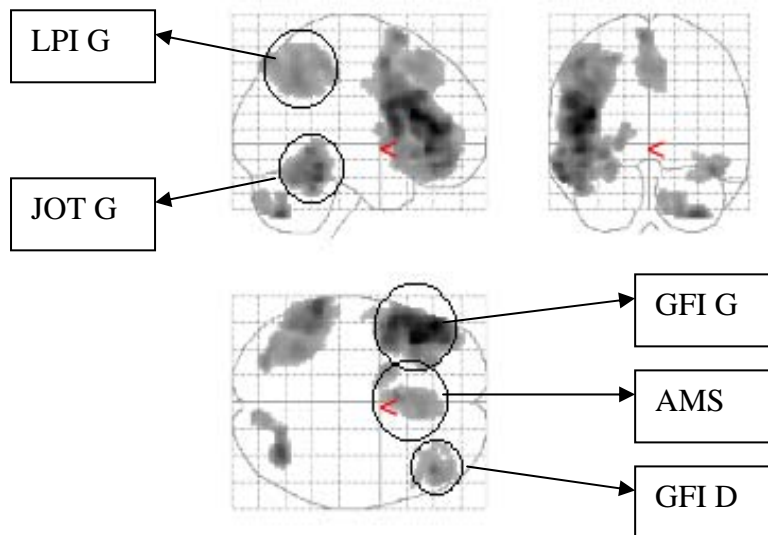
## **B.1.5 Quelques résultats complémentaires autour du GFI**

### **B.1.5.1 Un rôle de pivot du GFI gauche ? : une étude de connectivité**

Nous avons observé une différence entre les lecteurs sourds et entendants dans les cartes d'activation cérébrale obtenues à partir des données IRMf (analyse 2). Plus précisément, dans la tâche de jugement de rimes, nous avons observé une suractivation du GFI gauche chez le sourd (figure 12 et tableau 4 ; p. 101-102). Dans une analyse de connectivité, cette région a été identifiée comme jouant un rôle pivot dans l'organisation du réseau cortical lors de la réalisation d'une tâche de jugement visuel de rimes (Bitan *et al.*, 2005). Plus précisément, le GFI gauche modulerait l'activité des zones postérieures afin de contrôler la mise en œuvre du traitement phonologique (Bitan *et al.*, 2005; Bitan *et al.*, 2006). Nous nous sommes demandé si ce rôle de modulation du GFI ne variait entre les entendants et les sourds en particulier dans les interactions entre le GFI gauche et les autres régions du réseau d'activation trouvées dans le jugement visuel de rimes.

Afin d'examiner cette question, nous avons calculé la connectivité effective, c'est-à-dire l'influence qu'une région exerce sur l'activité d'une autre, chez les sourds et les entendants dans la tâche de jugement visuel de rimes en utilisant la méthode de Modélisation des Équations Structurelles (MES ou « SEM » en anglais). La méthode MES est une méthode statistique qui est utilisée principalement pour tester des hypothèses sur les influences causales entre des variables mesurées ou latentes. Elle permet de tester une variété de modèles théoriques qui émettent des hypothèses sur la façon dont ces variables sont liées les unes aux autres. L'estimation des paramètres dans la MES se fait en minimisant la différence entre la structure de variance-covariance observée (à partir des données) et celle prédite par le modèle proposé. Dans le cas de l'imagerie fonctionnelle, la structure de variance covariance se calcule à partir de la variation du signal des régions du modèle fournie par les résultats en IRMf. Les paramètres à calculer représentent alors la proportion d'activation dans une aire qui est déterminée par une autre aire.

Dans notre épreuve de jugement visuel de rimes, le modèle hypothétique est obtenu à partir de l'analyse en effets aléatoires de tous les sujets ensemble (entendants et sourds). Les régions trouvées ici ont été utilisées comme RDI pour l'analyse en connectivité effective (voir figure 18).



**Figure 18** - Régions activées pour tous les 24 sujets de l'analyse 2 (entendants et sourds ensemble).

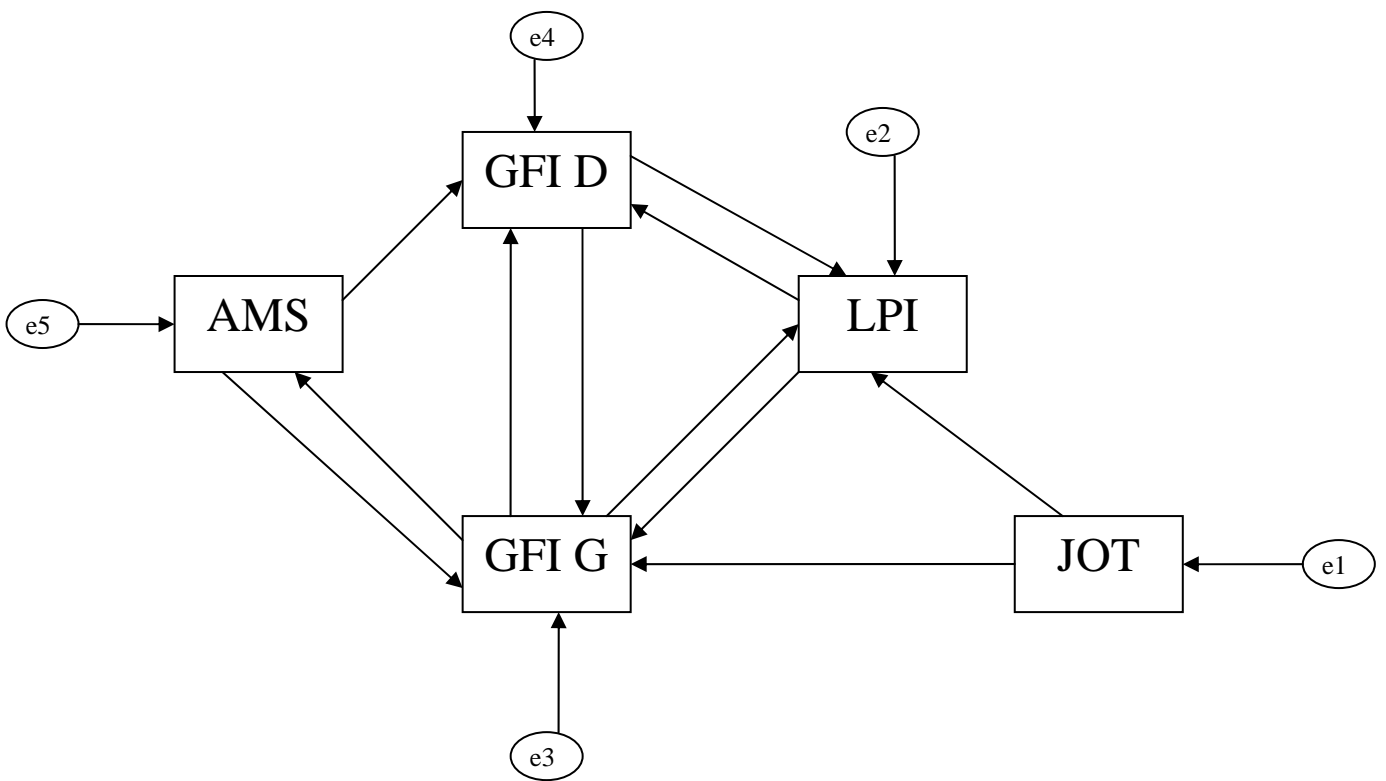
Les cinq régions activées qui constituent les RDI pour l'étude de connectivité sont encerclées. GFI = Gyrus frontal inférieur ; CpFM = Cortex préfrontal médial ; LPI = Lobe pariétal inférieur ; JOT = Jonction occipito-temporale ; G = Gauche ; D = droite.

Toutes les régions signalées ici étaient significatives pour une analyse non corrigée à  $p < 0.001$  au niveau du voxel. L'extension maximale des clusters est de  $k = 100$  voxels

Seuls les clusters d'activation plus grands que 100 voxels ont été inclus, ce qui donne cinq RDI d'intérêt : le lobe pariétal inférieur gauche (LPI), le gyrus frontal inférieur gauche, le gyrus frontal inférieur droit, l'aire motrice supplémentaire (AMS) et la jonction occipito-temporale gauche (JOT). Les valeurs du signal IRMf de chacune de ces régions ont été calculées à l'intérieur d'une sphère de 6 mm autour du pic d'activation de chaque sujet. Ces signaux ont été considérés comme les variables d'entrée à partir desquelles la structure de variance-covariance a été calculée.

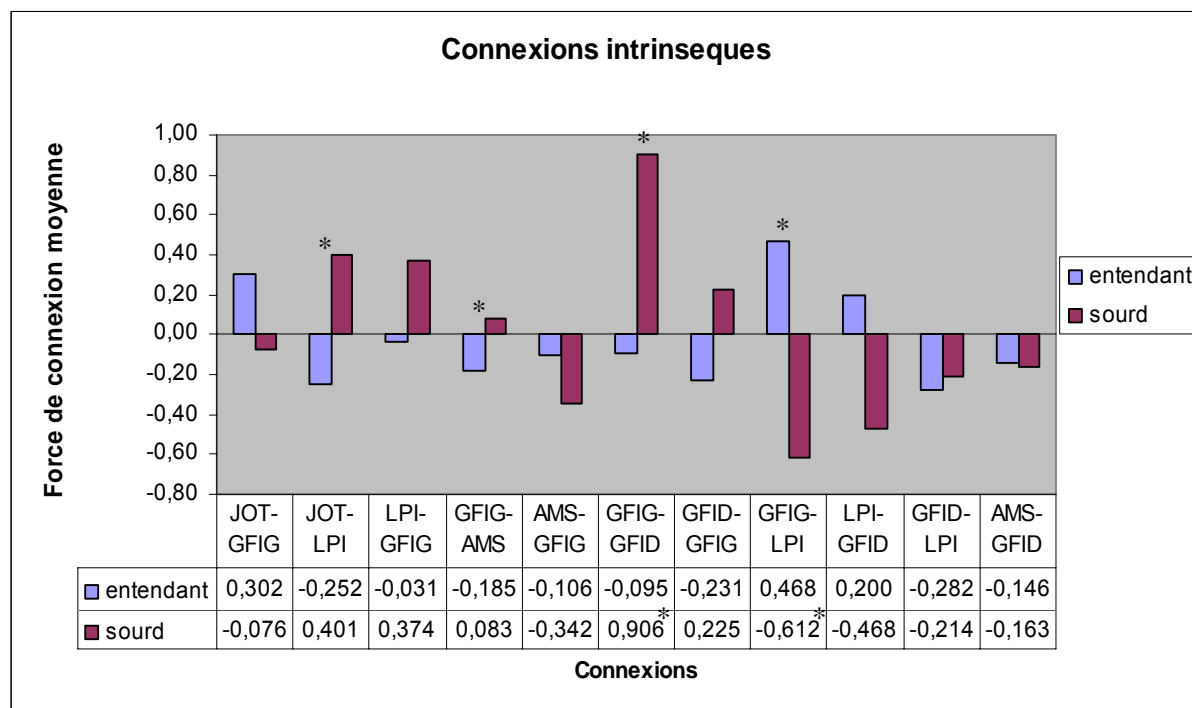
Ensuite, nous devons déterminer des modèles hypothétiques de connectivité entre ces cinq régions qui seraient cohérentes avec d'autres études sur le langage. Les équations du modèle structurel ont été calculées avec le logiciel AMOS (Arbuckle, 1989), qui utilise une méthode itérative afin de déterminer les paramètres de connexion entre les régions. Si l'ajustement (calculé avec le chi-carré) entre la structure de variance-covariance nouvelle et celle prédite par la tâche expérimentale (jugement visuel de rimes) et contrôle (jugement visuel de consonnes) ensemble, est suffisamment bon pour tous les sujets, nous pouvons accepter le modèle. C'était le cas pour le modèle présenté ci-dessous (figure 19), qui est cohérent avec nos connaissances sur le réseau du langage. En effet, l'entrée de l'information de la lecture du mot se produit à travers les aires occipitales et puis la jonction occipito-temporale qui peut être liée d'une part au GFI G à travers la voie ventrale et d'une autre au LPI à travers la voie dorsale.

La figure 19 présente les paramètres de notre modèle à estimer et qui indiqueront la connectivité effective entre les différentes régions.



**Figure 19** - modèle de connectivité hypothétique entre les principales régions activées lors du jugement de rimes

Les calculs ont montré que chez le sourd seules deux des connexions étudiées (GFI-GFID et GFID-LPI) étaient significatives (i.e. différentes de zéro) alors qu'aucune de ces connexions ne l'était chez l'entendant (voir les données en bas de la figure 20).



**Figure 20** - force moyenne des connexions intrinsèques prédites dans le modèle

Le fait que quasiment aucun lien proposé n'était suffisamment robuste (pas significativement différente de zéro) nous a empêché de valider la matrice de paramètres autour de la connectivité effective. Deux des facteurs qui peuvent avoir influencé l'absence de significativité des paramètres pourraient être, simplement, d'un côté l'existence d'une dispersion importante et de l'autre le nombre relativement réduit de sujets. En fait, beaucoup de paramètres étaient autour d'une probabilité de 0.2 et le simple fait de doubler la taille du groupe aurait sans doute été suffisant pour obtenir une significativité.

Malgré l'absence de validation des paramètres, nous avons trouvé que les trois connexions efférentes du GFI gauche (vers GFI droit, AMS et LPI) étaient significativement différentes

entre les groupes (figure 20). Plus précisément, les deux premières (GFI gauche vers GFI droit et vers AMS) étaient plus fortes chez le sourd tandis que la connexion restante (GFI gauche vers LPI) était plus forte chez l'entendant. Cela peut suggérer que la variation d'activité du sourd par rapport à l'entendant, dans le réseau de lecture de l'hémisphère gauche (notamment entre GFI et LPI) pourrait avoir été compensée à travers des connexions plus fortes du GFI gauche vers l'hémisphère droit et l'AMS afin d'augmenter les ressources fonctionnelles et l'effort cognitif nécessaire pour accomplir la tâche.

#### *Proposition de recherche n° 1*

*Cette analyse nous conduit à une première proposition de recherche. Nous avons utilisé la Modélisation d'Équations Structurelles (MES) afin d'estimer la connectivité effective. Cette méthode ne permet pas, en principe, de calculer toutes les connexions possibles entre les régions du modèle car le nombre de degrés de liberté doit être toujours supérieur ou égal à 1, ce qui limite le nombre d'hypothèses que nous pouvons proposer<sup>12</sup>. Une étude réalisée par Mechelli suggère l'utilisation d'une configuration d'un modèle composé de tous les sujets ensemble, ce qui augmente suffisamment les degrés de liberté pour pouvoir estimer toutes les connexions théoriquement possibles chez chaque sujet ((Mechelli, Penny, Price, Gitelman, & Friston, 2002) ; voir fig. 4). Néanmoins, ce calcul devient complexe car souvent l'itération n'est pas capable d'aboutir à une solution unique. De plus, le modèle est souvent difficile à valider. Une autre possibilité serait d'utiliser la Modélisation Dynamique Causale (MDC ou « DCM » en anglais) (Friston, Harrison, & Penny, 2003). Cette modélisation utilise une estimation de type bayésien afin de faire des inférences sur les paramètres. Chose intéressante, à la différence de la MES, la MDC permet de faire le calcul de toutes les connexions entre les régions. Toutefois, cette technique nécessite, dans le protocole IRMf,*

---

<sup>12</sup> Le nombre de degrés de liberté est le résultat d'une différence :  $\frac{1}{2}*(p*(p+1)) - n$  où  $p$  est le nombre de variables d'entrée (déterminées ici par le nombre de régions) et  $n$  est le nombre de paramètres à estimer (déterminées ici par le nombre de connexions). Dans notre cas, nous avons 5 régions et 11 paramètres à estimer dans la tâche expérimentale, ce qui donne un calcul de  $\frac{1}{2}*(5*6) - 11 = 15 - 11 = 4$  degrés de liberté. La limite des connexions que nous pourrions estimer serait de 14 (là il nous resterait un seul degré de liberté). Pourtant, 20 connexions sont possibles théoriquement.



*un temps de répétition (celui qui représente la période d'un scan) ne dépassant les 2-3 secs. En effet, des TR plus longs ne permettent pas d'effectuer des itérations correctes des équations différentielles proposées (Penny, Stephan, Mechelli, & Friston, 2004). Dans notre expérience du jugement visuel de rimes le TR était de 6 secs dans la tâche de jugement visuel de rimes, ce qui rend irréalisable l'application de la MDC. Il serait envisageable de créer une expérience similaire avec un TR plus court qui permettrait d'examiner les différentes connexions du réseau d'activation à travers le MDC.*

### **B.1.5.2 L'activation du GFI droit est-elle liée à la difficulté ? : des données de corrélation**

L'analyse de corrélation entre le niveau d'activation cérébrale et la performance du sujet nous permet d'avancer dans l'exploration de la fonctionnalité des régions significativement plus activées chez le lecteur sourd. En effet, si nous faisons l'hypothèse qu'une région influence le processus cognitif, nous nous attendions à trouver un lien entre son activité et la performance directement liée à ce traitement. Très peu de corrélations entre l'activité recueillie et la performance se sont révélées significatives pour les deux tâches (jugement visuel de rimes et décision lexicale) dans les deux groupes. Une des explications de ce résultat peut provenir du fait que nous avons réalisé une expérience en bloc qui fait que l'activation mesurée dans chaque région correspond à toutes les conditions confondues sans distinction des conditions de rimes ou des mots et pseudomots dans la tâche de décision lexicale. En outre, le nombre de sujets par groupes étant relativement restreint ( $n = 12$ ) nous contraind à trouver des valeurs de corrélations suffisamment élevées et/ou très peu dispersées pour parvenir à la significativité statistique.

Nos calculs de corrélations n'ont montré des corrélations significatives que dans la décision lexicale. Ceci peut s'expliquer par le fait que la variété des stimuli appartenant aux différentes conditions de la décision lexicale et par conséquent celui du traitement cognitif lié à ces conditions est moins inconstant que dans le jugement visuel de rimes. En effet, dans la

décision lexicale, nous distinguons deux types de stimuli : les mots et les pseudomots alors que dans le jugement visuel de rimes, nous avons quatre conditions (RH, NRNH, RNH, NRH). Cependant, les résultats ont montré des corrélations négatives chez le sourd dans le GFI droit (l'AB 44 et l'AB 45) et dans le CpFM (voir tableau 9) qui confortent l'idée déjà évoquée dans la discussion des tâches indiquant que l'activité de ces aires pourrait être liée à une difficulté du sujet dans l'accomplissement de la tâche. La corrélation négative dans le CpFM a été aussi observée chez l'entendant.

**Tableau 9**

Corrélations significativement différentes de zéro dans la tâche de décision lexicale

<i>Aire</i>	<b>Entendant</b>		<b>Sourd</b>	
	<i>Corrélation</i>	<i>P</i>	<i>Corrélation</i>	<i>p</i>
<b>AB 44 D</b>			-0.52	0.08
<b>AB 45 D</b>			-.50	0.09
<b>CpFM</b>	-0.56	0.06	-0.72	< 0.01

*Proposition de recherche n° 2*

*Nous venons de l'indiquer. L'expérience en bloc que nous avons analysée dans ce travail de thèse ne permet pas de discriminer les activités cérébrales par condition et d'analyser les corrélations entre la performance et l'activation de chaque condition de la tâche. Ces limites imposées par l'expérience en bloc est une des raisons qui nous a conduit à élaborer une expérience événementielle en IRMf dont nous présentons dans la section suivante la construction et les objectifs.*

## ***B.2 EXPÉRIENCE ÉVÉNEMENTIELLE : UNE AMÉLIORATION PAR RAPPORT À L'EXPÉRIENCE EN BLOC***

### **B.2.1 Introduction : nouvelles hypothèses**

L'analyse des résultats de l'expérience en bloc a permis de vérifier certaines hypothèses précises, mais dans le même temps, elle a engendré de nouvelles questions. En effet, le but de notre première expérience était de mieux comprendre, à travers l'étude psycholinguistique et neuroanatomique, la relation entre la personne sourde et la phonologie. Les résultats et l'interprétation que nous en faisons soulèvent de nouvelles questions. Par exemple, si comme nous le suggérons, les erreurs de jugement visuel de rimes des conditions inconsistantes (RNH et NRH) sont dues à une surutilisation de la voie graphophonologique, nous devrions observer lors des réponses erronées une activité cérébrale plus liée à cette voie que dans les réponses correctes dont l'activité serait supposée résulter de l'utilisation de la voie directe. Pour évaluer cette nouvelle hypothèse, nous devons être en mesure d'obtenir l'activation des erreurs et de bonnes réponses séparément, ce qui n'est pas possible avec l'expérience en bloc.

Pour tenter de répondre aux questions soulevées par les résultats de notre première expérience, nous avons conçu une seconde expérience en IRMf événementielle avec le jugement visuel de rimes et la décision lexicale comme tâches d'activation. La raison en est que le protocole événementiel permet de mesurer la réponse hémodynamique consécutive à chaque stimulation prise isolément. Autrement dit, nous pouvons calculer l'activation cérébrale pour chaque stimulation séparément pour ensuite obtenir la réponse hémodynamique moyenne du groupe de stimulations auxquelles nous nous intéressons (par ex stimulations appartenant à la condition d'une tâche). Il est important de signaler que cela se fait en regroupant les stimulations de la même condition et qui ont été convenablement décorréliées.

En tout cas, l'expérience événementielle nous permet de mesurer l'activité cérébrale des conditions isolées, faire des contrastes entre différentes conditions et comparer l'activation des réponses correctes et incorrectes, ce que ne permet pas l'expérience en bloc où les réponses hémodynamiques de différentes conditions étaient indiscernables puisqu'elles faisaient l'objet d'une sommation globale dans chaque bloc. Nous pouvons alors tenter de répondre à de nouvelles questions comme celle qui a été évoquée au début de cette section.

Dans la continuité de notre expérience en bloc, l'expérience événementielle respecte la structure du protocole que nous avons élaboré auparavant (mêmes tâches, conditions analogues ; cf. B.1.1.2) afin d'analyser les résultats à partir de la même base que celles des trois analyses de l'expérience en bloc. Par conséquent, les deux tâches expérimentales à réaliser sont les mêmes que dans l'expérience en bloc : la tâche de jugement visuel de rimes et la tâche de décision lexicale. Dans le jugement visuel de rimes, nous voulions surtout distinguer la réponse hémodynamique des conditions inconsistantes (NRH et RNH) de celle des conditions consistantes (RH et NRNH). Toutefois, afin d'éviter une expérience très longue et dans le même temps obtenir suffisamment de scans par condition pour disposer d'une bonne puissance statistique, nous nous sommes limités à deux des quatre conditions de la tâche de jugement visuel de rimes : une condition inconsistante (NRH) et une autre consistante (RH). Ces deux conditions nous semblent suffisantes pour répondre en priorité aux questions posées. Comme pour le jugement visuel de rimes, dans la décision lexicale, nous avons voulu aussi isoler deux conditions expérimentales : la décision pour les mots et les pseudomots.

Comment nous l'avons dit au début de cette section, la nouvelle expérience événementielle a été réalisée dans le but de répondre aux questions soulevées par les résultats de notre première étude et qui ne pouvaient pas être examinées par le protocole en bloc. Premièrement, nous pourrions séparer l'activité cérébrale entre les réponses erronées et les réponses correctes de la condition inconsistante (NRH), ce qui nous permettra d'observer s'il existe un réseau cérébral lié à la voie graphophonologique pour les réponses incorrectes.

Deuxièmement, nous pourrions examiner s'il existe une différence plus grande chez les sourds que chez les entendants au niveau de l'activation cérébrale lorsqu'on compare la condition inconsistante (NRH) et la condition consistante (RH) dans le jugement visuel de rimes ou lorsqu'on compare les mots et les pseudomots de la décision lexicale. Si la réponse est affirmative, nous pourrions suggérer qu'à l'intérieur de la tâche, la stratégie des lecteurs sourds varie plus en fonction de la condition que celle des lecteurs entendants. Jusqu'ici, quelques études (voir Perfetti, 2000 pour une revue) avaient évoqué la possibilité d'une différence de stratégie selon la tâche, mais aucune étude, à notre connaissance, n'a discuté la possibilité d'une variabilité entre les conditions d'une même tâche. Cela donnerait plus des arguments en faveur d'un processus contrôlé chez le lecteur sourd, une idée que nous développerons dans la discussion générale (cf. C.1.). Troisièmement, nous pouvons analyser les réponses cérébrales aux pseudomots de la décision lexicale. En effet, les données comportementales de l'expérience en bloc montrent que le temps de décision pour les pseudomots est plus long chez les sourds que chez les entendants (analyse 3). Ce résultat nous a amené à suggérer que le lecteur sourd était en difficulté dans l'utilisation de la voie graphophonologique et que cette difficulté pourrait concerner le recodage des mots. Une comparaison de l'activation cérébrale sous-tendant la décision sur les seuls pseudomots chez les sujets entendants et sourds nous permettrait d'aller plus loin dans la compréhension des raisons de la lenteur des réponses des sourds à ces items. Une compréhension susceptible d'être améliorée grâce au paradigme événementiel qui nous permettra aussi de déterminer des corrélations entre l'activité des régions activées pour les pseudomots et le TR des pseudomots, ce qui nous aide à discriminer entre les régions qui sont directement liées à la lenteur de ceux qui ne le sont pas.

Enfin, la réalisation de cette nouvelle étude était aussi le moment d'ajuster quelques paramètres afin qu'ils nous permettent de faire les analyses que nous n'avons pas pu réaliser lors de la première expérience. Par exemple, nous pouvons ici créer un protocole d'acquisition avec un temps de répétition (période d'un scan en IRMf) suffisamment court (3

secs max) et ainsi réaliser une étude de connectivité au moyen de la modélisation dynamique causale qui permet d'examiner toutes les influences exercées entre les régions activées (proposition de recherche n° 1). Nous pouvons ainsi tester notamment l'hypothèse du rôle du GFI gauche qui peut jouer comme pivot dans le réseau d'activité fonctionnelle des tâches phonologiques chez le sourd.

## **B.2.2 Méthodes de l'expérience évènementielle**

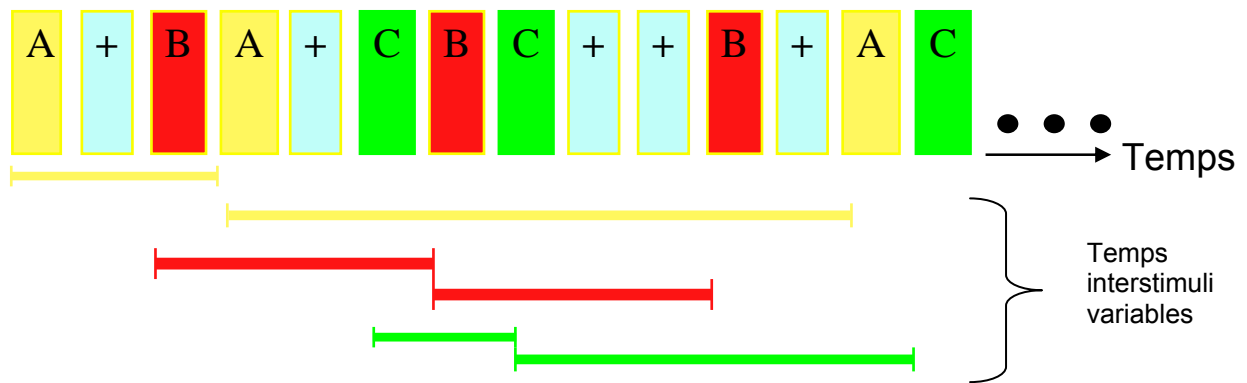
La constitution de deux groupes des sujets entendants et sourds comparables à ceux de l'expérience en bloc est en cours.

### **B.2.2.1 La pseudo-aléatorisation du signal**

Dans le protocole IRMf, la grande différence apportée par l'expérience évènementielle est que l'activité de chaque stimulation est mesurée individuellement tandis que dans l'expérience en bloc, nous mesurons un groupe (i.e. un bloc) de stimulations. Ceci fait que le signal résultant est assez robuste dans l'expérience en bloc puisqu'un bloc réunit la stimulation de la tâche expérimentale en groupes de dix stimulations consécutives (ce qui suppose 5 blocs ou scans du cerveau). Par conséquent le signal hémodynamique est stabilisé et sa mesure devient plus fiable, ce qui constitue un avantage, notamment dans la puissance statistique du calcul de l'activité des voxels. En revanche, dans un paradigme évènementiel, la mesure par stimulation souffre d'une certaine instabilité concernant la mesure du signal due principalement au chevauchement des signaux qui sont contigus temporellement mais appartiennent à différentes conditions. Pour résoudre ce problème, les premières expériences évènementielles, au début des années 1990, étaient conçues avec un temps inter-stimulus suffisamment élevé pour empêcher le chevauchement du signal hémodynamique (Rosen, Buckner, & Dale, 1998). Cette méthode permettait de détecter les signaux résultant de différentes conditions, mais elle ne devenait intéressante qu'avec un très grand nombre de stimuli. Lorsqu'un grand nombre de stimuli est nécessaire pour avoir un nombre minimum de scans par événement, l'expérimentateur doit maintenir le sujet dans

la machine pendant un temps très long, ce qui est souvent difficile et induit des problèmes d'attention et de concentration. Néanmoins, il est possible de réaliser de nombreuses stimulations peu espacées, ce qu'on appelle l'événementiel rapide. En effet, il a été montré que le signal généré par les différentes stimulations peu espacées du même événement se somment de façon linéaire ((Dale & Buckner, 1997) ; figure 4 ; p. 69), ce qui fait que nous pouvons déduire ces signaux. En outre, cela nous permet d'introduire des temps de répétition relativement courts (dans notre cas  $TR = 2.5$ ), ce qui nous permet aussi de mener une analyse de connectivité effective au moyen de la Modélisation Dynamique Causale (MDC) (Proposition de recherche n°1). Cette contiguïté de courbes hémodynamiques pose cependant un autre problème car si les courbes se chevauchent, nous courons le risque d'avoir une grande corrélation entre elles, ce qui est problématique puisque le calcul d'activité est effectué à partir d'une analyse de régression multiple dont les prédicteurs correspondent aux signaux engendrés par les différents événements et une grande corrélation enlèverait la puissance de prédiction de ces variables. De ce fait, il est nécessaire de construire un paradigme dans lequel les courbes hémodynamiques générées soient les plus décorrélatées possibles. Nous l'avons réalisé à l'aide du logiciel Optseq (Dale, 1999) qui aléatorise les stimulations des différentes conditions avec l'introduction d'une condition « nulle » de façon à que les courbes hémodynamiques aient une corrélation la plus faible possible entre elles. La prescription de cette condition de décorrélation fait que dans la littérature on l'appelle souvent une pseudo-aléatorisation.

Le schéma du protocole de notre expérience événementielle (avec seulement les premières stimulations) montre bien la pseudo-aléatorisation des stimulations. Le protocole est identique pour les deux tâches (jugement visuel de rimes et décision lexicale).



**Figure 21** Schéma de la distribution pseudo-aléatorisée des stimulations du protocole évènementiel. Chaque carré correspond à une seule stimulation. Le A et le B correspondent aux deux conditions expérimentales et le C à la condition contrôle. Le carré bleu (+) est la condition « nulle ». Les segments correspondent à la durée inter stimulus pour chaque condition.

A = RH (jugement visuel de rimes) ou mots (décision lexicale)

B = NRH (jugement visuel de rimes) ou pseudomots (décision lexicale)

C = condition contrôle : jugement de similarité de consonnes ou jugement visuel de symboles

+ = condition « nulle »

### B.2.2.2 Caractéristiques des deux tâches

Les stimulations des deux tâches se composent de 170 paires d'items : 85 appartenant à une condition expérimentale (par ex mots) et 85 appartenant à l'autre condition expérimentale (par ex. pseudomots). Les conditions contrôles des deux tâches sont les mêmes que dans l'expérience en bloc.

Les deux conditions expérimentales du jugement visuel de rimes sont la rime homographe (RH) et la non rime homographe (NRH) et dans la décision lexicale, ce sont les mots et les pseudomots. Les caractéristiques des items ainsi que la procédure des deux tâches sont les mêmes que celles décrites dans la procédure de la première expérience (B.1.1.2.2 et B.1.1.2.3). La seule différence était le temps de répétition (la période d'un scan) qui était fixé



à 2.5 secs pour les deux tâches et le temps inter stimulus qui du fait de l'aléatorisation est devenu variable<sup>13</sup>.

Enfin, nous avons utilisé l'élaboration du paradigme événementiel afin d'améliorer et/ou contrôler certains aspects dans les caractéristiques de la stimulation. Par exemple, un éventuel effet de la fréquence lexicale entre conditions n'était pas un facteur critique dans l'analyse de l'expérience en bloc car nous nous intéressions seulement aux différences d'activation globales de la tâche de jugement visuel de rimes (toutes les modalités confondues) entre les groupes. Cependant, dans la tâche de jugement visuel de rimes de l'expérience événementielle, nous allons comparer des différentes conditions de la rime (RH *contre* NRH) et en conséquence nous devrions contrôler l'effet de fréquence lexicale des différentes paires de rimes. Pour cela, nous avons utilisé les mêmes mots dans les deux conditions de la tâche et combiné de façon à obtenir des rimes-homographes, soit des non rimes-homographes (voir liste des mots de l'expérience événementielle dans la liste 3 de l'annexe).

A présent, seul le groupe des entendants est d'une taille suffisante pour l'analyse, quant au groupe des sourds il n'est composé que de quatre sujets répondant à nos critères d'inclusion. Aussi les hypothèses de cette expérience qui concernent principalement les sourds n'ont pas encore pu être testées

---

<sup>13</sup> La période entre deux stimulation pour aller de 2.5 secs à 25 secs



## **C DISCUSSION GENERALE**

L'analyse des temps de réponse des erreurs dans la tâche de jugement visuel de rimes de l'expérience en bloc nous suggère qu'une bonne partie des erreurs commises par les sourds dans les conditions inconsistantes sont de nature phonologique. De plus, ces erreurs pourraient être expliquées par une surutilisation de la voie graphophonologique. Cette idée est soutenue par les données en IRMf qui montrent une activation importante dans les régions du réseau de la lecture associées à la voie graphophonologique. Enfin, l'analyse des temps de réponse de la tâche de décision lexicale nous indique que le sourd pourrait être moins efficient lorsqu'il utilise la voie graphophonologique, ce qui évoque un profil de mauvais lecteur.

À partir des résultats de ces analyses, nous avons approfondi notre recherche d'un modèle explicatif des processus cognitifs mis en place chez le lecteur sourd qui puisse rendre compte de l'ensemble des résultats de nos différentes analyses. Nous proposons des pistes de recherche afin de valider ce modèle.

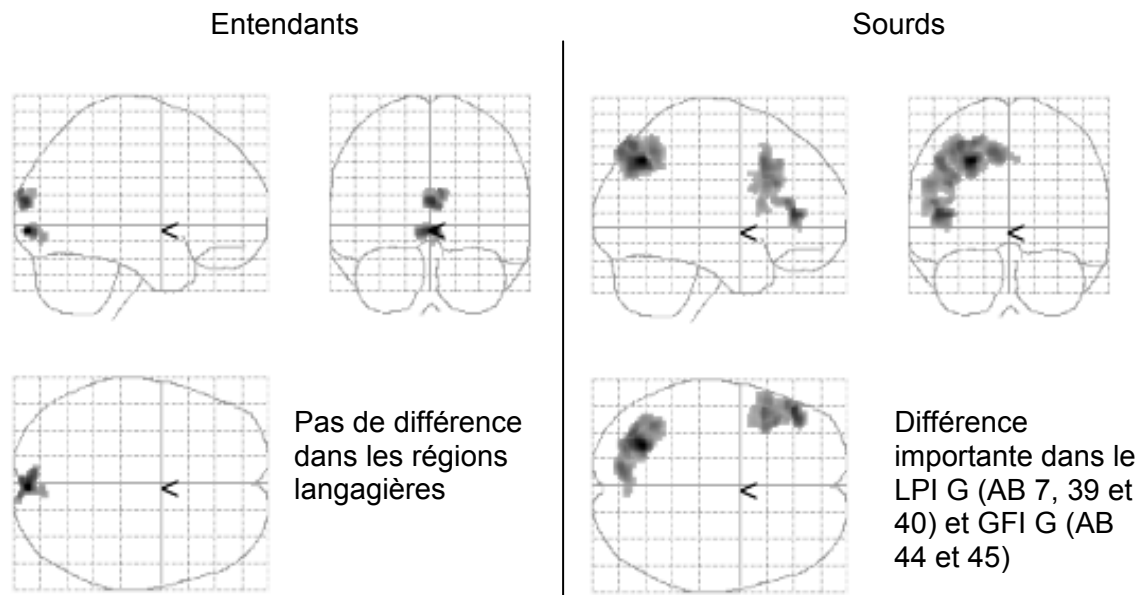
### ***C.1 UN TRAITEMENT CONTRÔLÉ CHEZ LE SOURD***

La revue de données de la littérature concernant le traitement phonologique chez la personne sourde révèle une grande hétérogénéité dans les résultats quant à la présence ou non d'un codage phonologique. Cette diversité paraît être fonction de la nature de la tâche au travers de laquelle le traitement phonologique est étudié. Plus précisément, les tâches qui font une demande explicite de traitement phonologique révèlent souvent que le sourd fait appel à la phonologie pour accomplir la tâche, alors que dans les tâches implicites, nous pouvons trouver des résultats divergents (cf. A.6.1). Il semble en tout cas que le sourd utilise des stratégies d'encodage phonologique flexibles, susceptibles de varier avec le mode de stimulation ou la nature de la tâche (Musselman, 2000). Autrement dit, les sourds ont des capacités de traitement phonologique mais elles ne sont pas toujours exploitées de la même

façon que chez l'entendant. Cette variabilité dans l'utilisation phonologique chez le sourd pourrait être caractéristique d'un processus contrôlé.

Un processus de type contrôlé est lié à la volonté du sujet mais en même temps s'avère coûteux en ressources attentionnelles (Hascher & Zacks, 1979). Certains résultats provenant des données en IRMf des deux tâches de lecture étudiées suggèrent la possibilité d'un processus contrôlé chez la personne sourde. En effet, l'activité cérébrale chez le sourd dans les deux tâches (figures 12 et 14 ; tableaux 4 et 7) révèle un réseau qui pourrait être associé à ce type de processus. Nous trouvons chez le lecteur sourd, d'une part, une plus forte activation du CpFM dans l'aire motrice supplémentaire (AB 6) et l'aire cingulaire antérieure (AB 32) qui sont toutes les deux liées à l'effort cognitif (Braver, Barch, Gray, Molfese, & Snyder, 2001; Garavan, Ross, Murphy, Roche, & Stein, 2002; Milham *et al.*, 2001; Ridderinkhof *et al.*, 2004; Ullsperger & von Cramon, 2004) et d'autre part, du cervelet droit qui a été associé aux processus de contrôle articulatoire de la parole (Ackermann, Wildgruber, Daum, & Grodd, 1998). Plus précisément, et dans le cadre du traitement du mot, ces deux aires paraissent faire partie d'un réseau impliqué dans la planification des mouvements articulatoires (Wise *et al.*, 1991), ce qui peut induire une demande attentionnelle accrue.

En outre, nous constatons chez le sourd une variabilité, selon la tâche, du réseau d'activation associé au traitement du mot écrit. En effet, lorsque nous faisons la soustraction entre le jugement visuel de rimes et la décision lexicale, il reste une grande activation dans les régions du lobe pariétal inférieur et le GFI gauches chez le sourd mais qui n'est pas retrouvée chez le lecteur entendant (figure 22). Ceci paraît indiquer l'utilisation de ressources différentes de la part du sourd selon les besoins de la tâche, ce que nous n'observons pas chez les lecteurs entendants. Ce résultat pourrait signifier que les entendants ont recours à un processus de lecture plus automatisé et par conséquent plus constant.

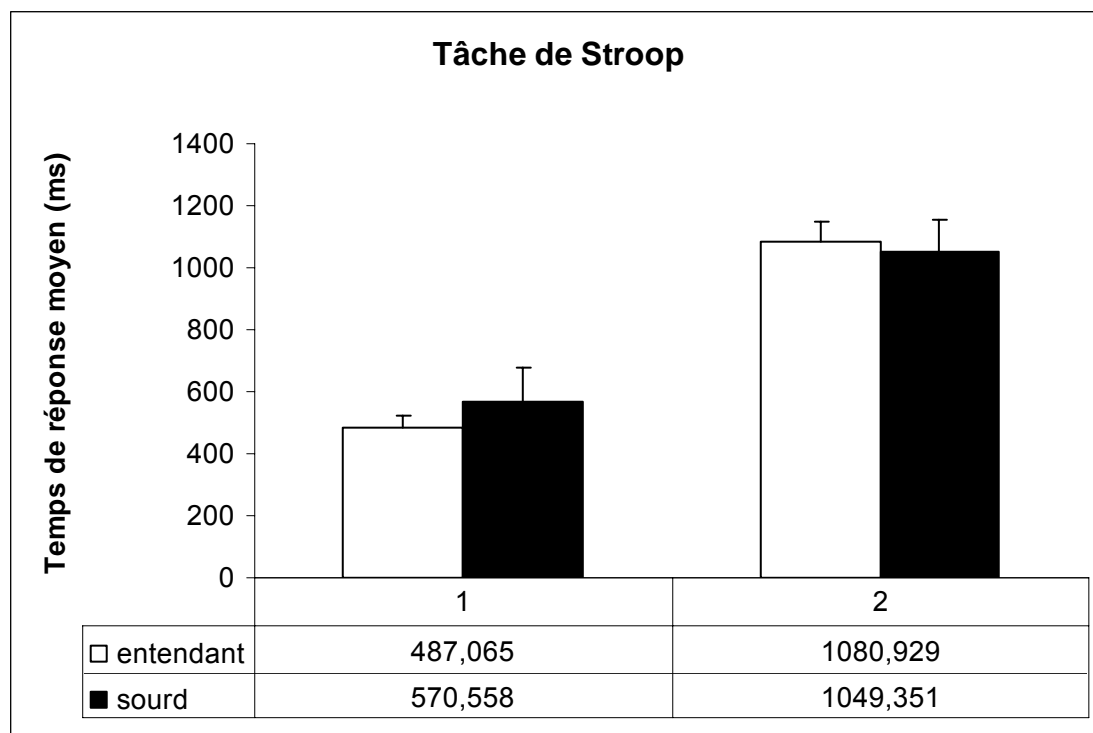


**Figure 22** - Soustraction entre la tâche de jugement visuel de rimes et la décision lexicale.

Toutes les régions signalées ici étaient significatives pour une analyse « two-sample t-test » non corrigé à  $p < 0.001$  au niveau du voxel. L'extension maximale des clusters est de  $k = 100$  voxels

Toutefois, l'idée d'un processus contrôlé chez le sourd ne semble pas soutenue par les données provenant de l'épreuve de Stroop. La tâche de Stroop vocale évalue l'automatisme de la lecture (Stroop, 1935). Le principe en est que les sujets doivent dénommer le plus rapidement possible des couleurs (noms écrits ou couleur de l'encre). Un résultat robuste chez les entendants est que le temps de dénomination est ralenti quand il s'agit de nommer la couleur (de l'encre) d'un mot écrit désignant une autre couleur (par exemple, dire bleu lorsque le mot vert est écrit en bleu). Ce ralentissement est qualifié comme un phénomène d'interférence. L'interprétation de cette interférence est que la forme phonologique des mots écrits est activée de manière automatique et irrépressible et qu'elle interfère avec la forme phonologique du nom de la couleur. Pour évaluer l'interférence nous avons soumis notre groupe de sourds à une tâche de Stroop vocale. Les résultats de cette expérience montrent

une interférence similaire chez les entendants et les sourds (voir figure 23), ce qui suggère un processus automatique dans l'activation de la forme phonologique des mots écrits.



**Figure 23.** Temps de réaction moyen par condition 1 = congruente : lire des mots de couleurs ; 2 = incongruente : dénommer la couleur de l'encre du mot mais pas le mot) et groupe de sujets (entendants et sourds).

En effet, si la lecture n'était pas automatisée, nous pourrions nous attendre à trouver une moindre interférence dans le groupe des sourds. Quelques études antérieures ont évalué la tâche de Stroop vocale chez le sourd et montrent que ces derniers manifestent une moindre interférence que les entendants (Allen, 1971; Leybaert & Alegria, 1993; Leybaert, Alegria, & Fonck, 1983). Plus précisément, il a été trouvé que le sourd avait moins d'interférence, voire aucune interférence, dans les cas où la qualité de la parole est pauvre. En revanche, les sourds dont la parole était intelligible avaient une interférence similaire aux entendants (Leybaert *et al.*, 1983). Nous avons distingué les sujets qui avaient une bonne intelligibilité de la parole ( $n = 7$  ; moyen = 3, 47) de ceux dont la parole était peu intelligible ( $n = 4$  ; moyen

= 0.725)<sup>14</sup>. Nous n'avons trouvé aucune corrélation significative entre la qualité de la parole et l'interférence à la tâche de Stroop (i.e. les sourds avec une mauvaise qualité de la parole ne manifestaient pas moins d'interférence dans le Stroop que ceux dont la parole était plus intelligible). En fait, l'analyse individuelle montre que tous les sujets sourds présentent une interférence importante. Une raison pour expliquer ces résultats pourrait être que les noms de couleurs sont des mots de haute fréquence et que, par conséquent, ils seraient traités de fait de façon automatique. Rappelons ici que nos résultats concernant les temps de réponse de la décision lexicale pour les mots de haute fréquence indiquaient que la latence est similaire entre les deux groupes (figure 17 ; p. 120).

### *Proposition de recherche n° 3*

*Il serait intéressant d'introduire et de tester des pseudomots homophones de couleurs (par ex. « rauze » ou « vaire » dans la tâche de Stroop comme l'ont fait Leybaert et Alegria (1993) dans leur expérience (Leybaert & Alegria, 1993). Pour être identifiés, ces pseudomots doivent être traités de façon préférentielle à travers la voie phonologique. Si le sourd rencontre des difficultés dans l'usage de règles phonologiques et mène un processus plutôt contrôlé, comme semblent l'indiquer leurs temps de réponse plus longs pour les pseudomots (cf. étude 3), nous pouvons nous attendre à trouver cette fois-ci une moindre interférence (par rapport à l'entendant) dans la condition incongruente de la tâche de Stroop.*

## **C.2 UN MODÈLE DE DEUXIÈME LANGUE CHEZ LE SOURD**

La relative flexibilité que semblent manifester des lecteurs sourds à l'égard des stratégies mises en œuvre lors de la lecture serait-elle le reflet d'un modèle de traitement d'une seconde langue apprise tardivement ? Nous pouvons le suggérer aussi à partir des activations cérébrales trouvées lors de l'exécution de nos tâches. En effet, les activations

---

<sup>14</sup> Nous avons quelques sujets qui ont refusé de parler et leur parole n'a pas pu être enregistré

cérébrales des sourds, comparées à celles qui sont observées chez les lecteurs entendants, sont d'une part moins latéralisées et d'autre part présentent une variabilité interindividuelle beaucoup plus forte. Ces deux traits ont été considérés comme caractéristiques d'un réseau d'activation verbale d'une langue apprise tardivement (Dehaene *et al.*, 1997; Kim, Relkin, Lee, & Hirsch, 1997; Perani *et al.*, 1996; Yetkin, Zerrin Yetkin, Haughton, & Cox, 1996). De plus, l'étude en IRMf chez le sourd a montré pour les deux tâches une plus grande activation dans le cortex cingulaire antérieur, semblable à celle rapportée par Dehaene *et al.* (1997) lors du traitement d'une langue apprise tardivement. Le rôle de cette aire est réputé lié au contrôle attentionnel (Kiehl *et al.*, 2000; Milham *et al.*, 2001). Il a été proposé que lors du traitement de l'information verbale d'une seconde langue, l'aire cingulaire serait plutôt impliquée dans le traitement attentionnel et le contrôle des processus langagiers (Neville & Bavelier, 1998).

À partir des données qui viennent d'être évoquées dans cette discussion générale, nous pourrions suggérer que confrontés à la représentation écrite de la langue orale, les sourds ne s'appuient pas sur un traitement verbal (et donc phonologique) automatique comme c'est le cas pour une langue maternelle mais plutôt sur un traitement verbal contrôlé, plus représentatif d'un processus de l'information verbale d'une seconde langue. Néanmoins, comme nous l'avons déjà expliqué à la fin de la section « le sourd et la lecture » (cf. A.6.3), nous devons tenir compte du fait particulier que les sourds de notre groupe d'étude n'avaient pas pour la plupart (dix sur treize) une véritable langue maternelle comme la langue des signes chez les sourds nés de parents sourds. Par conséquent, il n'est peut-être pas tout à fait adéquat d'utiliser le terme de « seconde langue » pour le sourd lorsque nous parlons des mécanismes de la langue orale. Ici, nous nous limitons à évoquer les ressemblances concernant le patron des activations cérébrales de nos sourds avec celui que décrivent les travaux qui ont examiné les mécanismes cérébraux sous-tendant le traitement d'une seconde langue chez l'entendant.



#### *Proposition de recherche n° 4*

*Il serait intéressant de réaliser en IRMf une étude comparative des mécanismes de traitement phonologique chez des sourds nés de parents sourds et des sourds nés de parents entendants qui auraient appris la langue orale à l'école mais qui se révèlent comme étant insuffisantes pour l'acquisition du répertoire phonologique. Une telle étude nous permettrait d'examiner les différences d'activation cérébrale dans une tâche phonologique entre ceux qui possèdent une langue maternelle et ceux qui ne l'ont pas.*

### **C.3 UNE VOIE FRONTO-PARIETALE DES REPRESENTATIONS**

#### **ARTICULATOIRES**

Nous ne pouvons pas écarter l'idée que l'activation conjointe du gyrus frontal supérieur dans le cortex préfrontal médial et du lobe pariétal inférieur (voie CpFM-LPI) chez le sourd reproduise la voie pariéto-frontale identifiée dans les études portant sur la lecture labiale (Calvert & Campbell, 2003; Paulesu *et al.*, 2003). Cette voie aurait un rôle dans la reconstruction interne du traitement dynamique de la parole (Calvert & Campbell, 2003) (cf. A.5.4), comme cela se passe dans le processus d'imitation dont les séquences dynamiques doivent être représentées sans la stimulation motrice. Dans ces processus d'imitation, nous trouvons aussi une activation de la voie pariéto-frontale (Buccino *et al.*, 2004).

Dans la tâche de jugement visuel de rimes, l'effort d'articulation de la parole que le sourd doit produire pour décoder la phonologie du mot (ce qui est suggéré par l'activation de l'AB 44) peut se refléter dans une demande plus forte de ces représentations articulatoires. Une difficulté qui est suggérée par l'activation du GFI dans l'hémisphère droit. Il est important de souligner que cette voie ne remplacerait pas la voie phonologique. Il est possible qu'à la surutilisation de la voie phonologique proposée dans l'étude 2 (réseau du GFI-LPI) s'ajoute une fonction de représentation articulatoire (voie CpFM-LPI).

*Proposition de recherche n° 5*

*Calvert et Campbell (2003) ont réalisé une tâche de lecture labiale en IRMf chez les entendants. Deux conditions ont été proposées dans cette étude. Dans la première condition, la lecture labiale avait lieu dans une situation naturelle, avec une émission de la parole qui comportait toutes les composantes dynamiques, dans la seconde, la lecture labiale était réalisée dans des conditions « statiques » avec une présentation de la parole à partir d'un visage fixe sans mouvement des lèvres (Calvert & Campbell, 2003). Il serait intéressant de proposer à des sujets sourds une tâche de jugement de rimes reposant sur la lecture labiale avec une émission de la parole en conditions statique et dynamique afin de savoir si la voie pariéto-frontale s'active plus dans une condition dynamique et de façon plus importante chez les sujets sourds que chez les sujets entendant. Ceci montrerait que l'accès à ces représentations phonologiques stockées est une ressource plus développée chez le sourd, peut-être du fait d'un mode d'acquisition de la parole fondamentalement visuel.*

## CONCLUSION

À la différence de beaucoup d'autres propositions ou théories dans d'autres domaines intellectuels, la recherche est astreinte à la méthode expérimentale qui met à l'épreuve les idées ou les hypothèses qui ont pu être créées par un raisonnement déductif. Toutefois, certains aspects d'une question ou d'une situation que l'expérience tente de reproduire peuvent échapper à la méthode d'analyse et sont difficilement contrôlables. En effet, les hypothèses sont le plus souvent créées dans le cadre de stratégies *a priori* qui peuvent influencer la décision des objectifs de recherche. La problématique que soulève l'étude des personnes sourdes est d'abord sociale avec un objectif d'intégration et cela peut, sans doute, avoir influencé le raisonnement hypothétique du chercheur. Dans la littérature que j'ai abordé et qui était strictement scientifique, j'ai cru pouvoir distinguer au moins deux grandes approches scientifiques et qui peuvent être reliées à des domaines relevant de l'idéologie sociale : la première aborde l'idée de l'intégration et de l'adaptation d'une minorité, comme celle des sourds, à la majorité qui est celle de l'entendant, la deuxième semble se situer dans le cadre d'un idéal de relativisme culturel, aborde sa particularité et sa différence comme une priorité.

La question de la qualité des représentations phonologiques chez le sourd semble liée à la première approche. Nous l'avons vu, la phonologie étant un aspect essentiel pour l'apprentissage de la lecture, le sujet sourd n'échapperait pas à cette norme et il aurait besoin d'une stimulation phonologique satisfaisante afin d'avoir un bon développement linguistique et parvenir à une bonne maîtrise de la lecture. Cependant, beaucoup de sourds ne peuvent acquérir la phonologie qu'à travers la lecture labiale qui fournit une information moins riche et plus ambiguë que celle fournie par l'audition, ce qui ne permettrait aux sourds que de constituer une représentation phonologique limitée. Cela aura des conséquences sur le développement de la conscience phonologique, l'encodage et le recodage phonologique des mots et par conséquent sur la lecture (cf. A.2). Il serait donc souhaitable de trouver des

moyens pour que l'enfant sourd puisse accéder à la phonologie à partir des modalités sensorielles préservées, ce que lui permettrait alors d'atteindre un meilleur niveau de lecture. Dans cette perspective, Cornett, en 1967, a mis au point le langage parlé complété (Cornett, 1967), un système de signaux visuels qui permet de fournir les informations manquantes dans la lecture labiale. L'utilisation du LPC a des conséquences positives sur la phonologie et la lecture chez le sourd. Les enfants sourds qui se sont servis dès la petite enfance atteignent des niveaux de lecture similaires à ceux des entendants. Le LPC a donc permis de montrer qu'une acquisition précoce de la phonologie à travers une modalité visuelle est suffisante pour acquérir un bon niveau de lecture. Cependant, il reste à démontrer la nécessité de la phonologie. Autrement dit, le sourd, peut-il apprendre à lire à travers une autre procédure qui éluderait la phonologie et qui serait, peut-être, plus adaptée à son contexte ? Cette question introduit la deuxième approche.

Cette deuxième approche tenterait de dépasser l'idée de la phonologie. Afin d'analyser la question, il est suggéré d'examiner la problématique de la lecture chez le sourd dans un contexte particulier, différent de celui de l'entendant. Le sourd pourrait développer des stratégies idiosyncrasiques et plus adaptées à leurs capacités sensorielles. Ces stratégies seraient, par exemple, basées plus sur l'orthographe que sur la phonologie. De plus, le sourd pourrait à travers la lecture compenser des aspects de la langue orale, déficitaires chez l'enfant sourd pré-lecteur, comme le vocabulaire et la syntaxe. Dans une telle perspective, la mise en place des apprentissages devrait favoriser les alternatives à l'apprentissage phonique et oralisé, qui s'adapteraient mieux au contexte perceptif particulier du sourd et en particulier à sa langue « naturelle » qui est la langue des signes.

De ce point de vue, où se situe notre travail ? Notre travail suggère que le sourd pourrait avoir un comportement déviant par rapport au normo-lecteur entendant mais non qualitativement différent (Burden & Campbell, 1994 ; Hayes & Arnold, 1992). Le sourd ne paraît pas avoir un empêchement majeur pour accéder à la phonologie des mots (analyse 1) et les difficultés qu'il rencontre sont semblables à celles des mauvais lecteurs entendants,

c'est-à-dire une surutilisation de la voie phonologique (analyse 2) et paradoxalement, une utilisation moins efficiente de cette voie (analyse 3). De plus, le réseau d'activation cérébrale de la lecture déterminée par l'IRMf chez le sourd est comparable à celui d'un sujet entendant qui traite une langue seconde, ce qui entrerait plutôt dans la première approche exposée. Cependant, je voudrais signaler mon contexte personnel par rapport au sourd dans ces études. Mon contact avec la communauté des sourds a été infime et s'est limité à quelques présentations et la passation d'épreuves, ce qui a pu aussi influencer mon questionnement. En effet, j'ai défendu dans cette thèse une position voisine de la première approche tandis que la deuxième approche est d'habitude défendue par des gens les plus proches de la communauté sourde, ou qui participent activement à leur vie sociale.

Pour conclure, il me paraît important de finir par le début et d'insister qu'un des buts majeurs de l'évaluation des capacités phonologiques des sourds est de connaître mieux leurs forces et leurs limites afin de pouvoir développer des outils convenables pour leur apprentissage de la lecture. Lire est un objectif commun qui doit se réaliser pour chaque individu car dans une société de communication comme la nôtre, la difficulté de lecture constitue un élément important d'exclusion en soi. Les études sur le langage parlé complété ont montré comment les compétences phonologiques et de lecture des sourds qui ont appris le LPC de façon précoce parviennent à un bon niveau de lecture. Cependant, de très nombreux sourds n'ont même pas une langue maternelle (comme la langue des signes) car elle a été acquise en dehors de la période sensitive. Nous ne savons pas si ces sujets pourraient développer d'autres stratégies alternatives à l'utilisation de la phonologie pour la lecture de mots. Notre étude ne suggère pas cela.

Enfin, comme nous avons dit, ce travail de thèse a généré plus de questions que de réponses et nous espérons que la communauté scientifique, notamment avec les outils d'imagerie, pourra avancer dans ces questions qui restent à éclaircir.



## RÉFÉRENCES

- Aaron, P. G., Keetay, V., Boyd, M., Palmatier, S., & Wacks, J. (1998). Spelling without phonology: A study of deaf and hearing children. *Reading & Writing, 10*, 1-22.
- Ackermann, H., Wildgruber, D., Daum, I., & Grodd, W. (1998). Does the cerebellum contribute to cognitive aspects of speech production? A functional magnetic resonance imaging (fMRI) study in humans. *Neurosci Lett, 247*(2-3), 187-190.
- Alegria, J., Dejean, K., Capouillez, J.-M., & Leybaert, J. (1990). Role played by Cued Speech in the identification of written words encountered for the first time by deaf children: A preliminary report. *Cued Speech Journal, 4*, 4-9.
- Alegria, J., & Leybaert, J. (2005). Le langage par les yeux chez l'enfant sourd : lecture, lecture labiale et langage parlé complété. In C. Transler, J. Leybaert & J. Gombert (Eds.), *L'acquisition du langage par l'enfant sourd*. Marseille: Solal.
- Alexander, M. P., & Schmitt, M. A. (1980). The aphasia syndrome of stroke in the left anterior cerebral artery territory. *Arch Neurol, 37*(2), 97-100.
- Allen, D. V. (1971). Color-word interference in deaf and hearing children. *Psychonomic Science, 24*(6), 295-296.
- Amunts, K., Schleicher, A., Burgel, U., Mohlberg, H., Uylings, H. B., & Zilles, K. (1999). Broca's region revisited: cytoarchitecture and intersubject variability. *J Comp Neurol, 412*(2), 319-341.
- APA. (1994). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders* (4th ed.). Washington, DC: American Psychiatric Association.
- Aparicio, M., Gounot, D., Demont, E., & Metz-Lutz, M. N. (2007). Phonological processing in relation to reading: An fMRI study in deaf readers. *Neuroimage, 35*(3), 1303-1316.
- Arbuckle, J. (1989). Analysis of moment structures. *Am Stat, 43*, 66-67.
- Backman, J., Bruck, M., Hebert, M., & Seidenberg, M. (1984). Acquisition and use of spelling-sound correspondences in reading. *Journal of Experimental Child Psychology, 38*, 114-133.
- Baddeley, A. (1981). The concept of working memory: a view of its current state and probable future development. *Cognition, 10*(1-3), 17-23.
- Baddeley, A. (1982). Reading and working memory. *Bulletin of the British Psychological Society, 35*, 414-417.
- Baddeley, A., & Hitch, G. J. (1974). Working Memory. In G. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation* (pp. 47-90). New York: Academic Press.
- Bakwin, H. (1973). Reading disability in twins. *Dev Med Child Neurol, 15*(2), 184-187.
- Barron, R. W. (1986). Word recognition in early reading: a review of the direct and indirect access hypotheses. *Cognition, 24*(1-2), 93-119.

- Bauer, R. H. (1977). Memory processes in children with learning disabilities: evidence for deficient rehearsal. *J Exp Child Psychol*, 24(3), 415-430.
- Bauer, R. H. (1979). Memory, acquisition, and category clustering in learning-disabled children. *J Exp Child Psychol*, 27(3), 365-383.
- Beech, J. R., & Harris, M. (1997). The prelingually deaf young reader: A case of reliance on direct lexical access? *Journal of Research in Reading*, 20(2), 105-121.
- Bellugi, U., Tzeng, O., Klima, E. S., & Fok, A. (1989). Dyslexia: Perspectives from sign and script. In A. M. Galaburda (Ed.), *From reading to nerons* (pp. 137-171). Cambridge, MA: MIT Press.
- Bernstein, L. E., Auer, E. T., Jr., Moore, J. K., Ponton, C. W., Don, M., & Singh, M. (2002). Visual speech perception without primary auditory cortex activation. *Neuroreport*, 13(3), 311-315.
- 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. *J Neurosci*, 17(1), 353-362.
- Binder, J. R., Medler, D. A., Desai, R., Conant, L. L., & Liebenthal, E. (2005). Some neurophysiological constraints on models of word naming. *Neuroimage*, 27(3), 677-693.
- Bitan, T., Booth, J. R., Choy, J., Burman, D. D., Gitelman, D. R., & Mesulam, M. M. (2005). Shifts of effective connectivity within a language network during rhyming and spelling. *J Neurosci*, 25(22), 5397-5403.
- Bitan, T., Burman, D. D., Lu, D., Cone, N. E., Gitelman, D. R., Mesulam, M. M., et al. (2006). Weaker top-down modulation from the left inferior frontal gyrus in children. *Neuroimage*, 33(3), 991-998.
- Blachman, B. A. (1984). Relationship of rapid naming ability and language analysis skills to kindergarten and first-grade reading achievement. *Journal of Educational Psychology*, 76, 610-622.
- Bookheimer, S. (2002). Functional MRI of language: new approaches to understanding the cortical organization of semantic processing. *Annu Rev Neurosci*, 25, 151-188.
- Booth, J. R., Burman, D. D., Meyer, J. R., Gitelman, D. R., Parrish, T. B., & Mesulam, M. M. (2002). Functional anatomy of intra- and cross-modal lexical tasks. *Neuroimage*, 16(1), 7-22.
- Booth, J. R., Burman, D. D., Meyer, J. R., Gitelman, D. R., Parrish, T. B., & Mesulam, M. M. (2003). Relation between brain activation and lexical performance. *Hum Brain Mapp*, 19(3), 155-169.
- Booth, J. R., Burman, D. D., Meyer, J. R., Gitelman, D. R., Parrish, T. B., & Mesulam, M. M. (2004). Development of brain mechanisms for processing orthographic and phonologic representations. *J Cogn Neurosci*, 16(7), 1234-1249.
- Borel-Maisonny, S. (1985). *Langage oral et écrit*. Delachaux et Niestlé.
- Bradley, L., & Bryant, P. (1983). Categorizing sounds and learning to read - a causal connection. *Nature*, 301, 419-421.



- Braver, T. S., Barch, D. M., Gray, J. R., Molfese, D. L., & Snyder, A. (2001). Anterior cingulate cortex and response conflict: effects of frequency, inhibition and errors. *Cereb Cortex*, 11(9), 825-836.
- Brett, M., Anton, J. L., Valabregue, R., & Poline, J. B. (2002). *Region of interest analysis using an SPM toolbox*. Paper presented at the 8th International Conference on Functional Mapping of the Human Brain, Sendai, Japan.
- Brodmann, K. (1909). *Vergleichende Lokalisationslehre der Grosshirnrinde in ihren Prinzipien dargestellt auf Grund des Zellenbaues*. Leipzig: Barth JA.
- Bruck, M., & Waters, G. (1988). An analysis of the spelling errors of children who differ in their reading and spelling skills. *Applied Psycholinguistics*, 9, 77-92.
- Brunswick, N., McCrory, E., Price, C. J., Frith, C. D., & Frith, U. (1999). Explicit and implicit processing of words and pseudowords by adult developmental dyslexics: A search for Wernicke's Wortschatz? *Brain*, 122(Pt 10), 1901-1917.
- Buccino, G., Binkofski, F., Fink, G. R., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., et al. (2001). Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: an fMRI study. *Eur J Neurosci*, 13(2), 400-404.
- Buccino, G., Vogt, S., Ritzl, A., Fink, G. R., Zilles, K., Freund, H. J., et al. (2004). Neural circuits underlying imitation learning of hand actions: an event-related fMRI study. *Neuron*, 42(2), 323-334.
- Buchsbaum, B., Pickell, B., Love, T., Hatrak, M., Bellugi, U., & Hickok, G. (2005). Neural substrates for verbal working memory in deaf signers: fMRI study and lesion case report. *Brain Lang*, 95(2), 265-272.
- Buckner, R. L., Corbetta, M., Schatz, J., Raichle, M. E., & Petersen, S. E. (1996). Preserved speech abilities and compensation following prefrontal damage. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 93(3), 1249-1253.
- Burden, V. (1992). Why are some 'normal' readers such poor spellers? In C. Sterling & C. Robson (Eds.), *Psychology, Spelling and Education* (pp. 200-214). London: Multilingual Matters.
- Burden, V., & Campbell, R. (1994). The development of word-coding skills in the born deaf: An experimental study of deaf school-leavers. *British Journal of Developmental Psychology*, 12(3), 331-349.
- Butterfield, E. C., & Wambold, C. (1973). On the theory and practice of improving short-term memory. *Am J Ment Defic*, 77(5), 654-659.
- Calvert, G. A., Brammer, M. J., Morris, R. G., Williams, S. C., King, N., & Matthews, P. M. (2000). Using fMRI to study recovery from acquired dysphasia. *Brain Lang*, 71(3), 391-399.
- Calvert, G. A., Bullmore, E. T., Brammer, M. J., Campbell, R., Williams, S. C., McGuire, P. K., et al. (1997). Activation of auditory cortex during silent lipreading. *Science*, 276(5312), 593-596.
- Calvert, G. A., & Campbell, R. (2003). Reading speech from still and moving faces: the neural substrates of visible speech. *J Cogn Neurosci*, 15(1), 57-70.

- Campbell, R., Brooks, B., de Haan, E., & Roberts, T. (1996). Dissociating face processing skills: decision about lip-read speech, expression, and identity. *Q J Exp Psychol A*, 49(2), 295-314.
- Campbell, R., & Dodd, B. (1980). Hearing by eye. *Q J Exp Psychol*, 32(1), 85-99.
- Campbell, R., MacSweeney, M., Surguladze, S., Calvert, G., McGuire, P., Suckling, J., et al. (2001). Cortical substrates for the perception of face actions: an fMRI study of the specificity of activation for seen speech and for meaningless lower-face acts (gurning). *Brain Res Cogn Brain Res*, 12(2), 233-243.
- Campbell, R., & Wright, H. (1988). Deafness, spelling and rhyme: how spelling supports written word and picture rhyming skills in deaf subjects. *Q J Exp Psychol A*, 40(4), 771-788.
- Charlier, B. L., & Leybaert, J. (2000). The rhyming skills of deaf children educated with phonetically augmented speechreading. *Q J Exp Psychol A*, 53(2), 349-375.
- Cohen, L., Dehaene, S., Naccache, L., Lehericy, S., Dehaene-Lambertz, G., Henaff, M. A., et al. (2000). The visual word form area: spatial and temporal characterization of an initial stage of reading in normal subjects and posterior split-brain patients. *Brain*, 123(Pt 2), 291-307.
- Coltheart, M., Curtis, B., Atkins, P., & Haller, M. (1993). Models of reading aloud: Dual-route and parallel-distributed-processing approaches. *Psychological Review*, 100(4), 589-608.
- Coltheart, M., Rastle, K., Perry, C., Langdon, R., & Ziegler, J. (2001). DRC: a dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychol Rev*, 108(1), 204-256.
- Conrad, R. (1979). *The deaf schoolchild: Language and cognitive function*. London: Harper & Row.
- 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.
- Cornett, O. (1967). Cued speech. *American Annals of the Deaf*, 112, 3-13.
- Costello, A. L., & Warrington, E. K. (1989). Dynamic aphasia: the selective impairment of verbal planning. *Cortex*, 25(1), 103-114.
- Curtiss, S. (1977). *Genie: a psycholinguistic study of a modern day "wild child."*. New York: Academic Press.
- D'Hondt, M., & Leybaert, J. (2003). Lateralization effects during semantic and rhyme judgement tasks in deaf and hearing subjects. *Brain Lang*, 87(2), 227-240.
- Dale, A. M. (1999). Optimal experimental design for event-related fMRI. *Hum Brain Mapp*, 8(2-3), 109-114.
- Dale, A. M., & Buckner, R. L. (1997). Selective Averaging of rapidly presented Individual trials Using fMRI. *Hum Brain Mapp*, 5(5), 329-340.
- Damasio, A. R. (1992). Aphasia. *N Engl J Med*, 326(8), 531-539.

- Decroly, O. (1927). *La méthode Decroly, sa portée, sa pratique*: La Cordée.
- DeFries, J. C., Singer, S. M., Foch, T. T., & Lewitter, F. I. (1978). Familial nature of reading disability. *Br J Psychiatry*, *132*, 361-367.
- Dehaene, S., Cohen, L., Sigman, M., & Vinckier, F. (2005). The neural code for written words: a proposal. *Trends Cogn Sci*, *9*(7), 335-341.
- Dehaene, S., Dupoux, E., Mehler, J., Cohen, L., Paulesu, E., Perani, D., et al. (1997). Anatomical variability in the cortical representation of first and second language. *Neuroreport*, *8*(17), 3809-3815.
- Dehaene, S., Naccache, L., Cohen, L., Bihan, D. L., Mangin, J. F., Poline, J. B., et al. (2001). Cerebral mechanisms of word masking and unconscious repetition priming. *Nat Neurosci*, *4*(7), 752-758.
- Dodd, B. (1980). The spelling abilities of profoundly pre-linguistically deaf children. In U. Frith (Ed.), *Cognitive processes in spelling* (pp. 423-443). New York: Academic press.
- Dodd, B. (1987). Lip-reading, phonological coding and deafness. In B. Dodd & R. Campbell (Eds.), *Hearing by eye : the psychology of lip-reading*. London: Lawrence Erlbaum.
- Dodd, B., & Hermelin, B. (1977). Phonological coding by the prelinguistically deaf. *Perception and Psychophysics*, *21*, 413-417.
- Donders, F. C. (1969). On the speed of mental processes. *Acta Psychologica*, *30*, 412-431.
- Ducharme, D. A., & Mayberry, R. I. (2005). L'importance d'une exposition précoce au langage: La période critique s'applique au langage signé tout comme au langage oral. In C. Transler, J. Leybaert & J. Gombert (Eds.), *L'acquisition du langage oral par l'enfant sourd* (pp. 15-28). Marseille: Solal.
- Dufour, A., Brochard, R., Despres, O., Scheiber, C., & Robert, C. (2004). Perceptual encoding of fingerspelled and printed alphabet by deaf signers: an fMRI study. *Percept Mot Skills*, *98*(3 Pt 1), 971-982.
- Dyer, A., MacSweeney, M., Szczerbinski, M., Green, L., & Campbell, R. (2003). Predictors of reading delay in deaf adolescents: the relative contributions of rapid automatized naming speed and phonological awareness and decoding. *J Deaf Stud Deaf Educ*, *8*(3), 215-229.
- Ehri, L. C. (1995). Phases of development in learning to read words by sight. *Journal of Research in Reading*, *18*(2), 116-125.
- Emmorey, K., Allen, J. S., Bruss, J., Schenker, N., & Damasio, H. (2003). A morphometric analysis of auditory brain regions in congenitally deaf adults. *Proc Natl Acad Sci U S A*, *100*(17), 10049-10054. Epub 12003 Aug 10046.
- Evans, A. C., Collins, D. L., & Millner, B. (1992). *An MRI-based stereotactic atlas from 250 young normal subjects*. Paper presented at the Society for Neurosciences.
- Fiebach, C. J., Friederici, A. D., Müller, K., & von Cramon, D. Y. (2002). fMRI evidence for dual routes to the mental lexicon in visual word recognition. *J Cogn Neurosci*, *14*(1), 11-23.

- Fiez, J. A. (1997). Phonology, semantics, and the role of the left inferior prefrontal cortex. *Hum Brain Mapp*, 5(2), 79-83.
- Fiez, J. A., & Petersen, S. E. (1998). Neuroimaging studies of word reading. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 95(3), 914-921.
- Fletcher, J. M., Shaywitz, S. E., & Shankweiler, D. P. (1994). Cognitive profiles of reading disability: Comparisons of discrepancy and low achievement definitions. *J Ed Psychology*, 86, 6-23.
- Fowler, C. A., & Dekle, D. J. (1991). Listening with eye and hand: cross-modal contributions to speech perception. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 17(3), 816-828.
- France, N. (1981). *The Primary Reading Test*. Windsor: NFER-Nelson.
- 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. *Cereb Cortex*, 10(7), 698-705.
- Friston, K. J., Harrison, L., & Penny, W. (2003). Dynamic causal modelling. *Neuroimage*, 19(4), 1273-1302.
- Friston, K. J., Holmes, A., Worsley, K. J., Poline, J. B., Frith, C. D., & Frackowiak, R. S. (1995). Statistical parametric mapping functional imaging: a general linear approach. *Hum Brain Mapp*, 2, 189-210.
- Frith, C. D. (1985). Beneath the surface of developmental dyslexia. In K. Patterson, J. C. Marshall & M. Coltheart (Eds.), *Surface dyslexia: Cognitive and neuropsychological studies of phonological reading*. (pp. 301-330). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Frost, R. (1998). Toward a strong phonological theory of visual word recognition: true issues and false trails. *Psychol Bull*, 123(1), 71-99.
- Galaburda, A. M., Sherman, G. F., Rosen, G. D., Aboitiz, F., & Geschwind, N. (1985). Developmental dyslexia: four consecutive patients with cortical anomalies. *Ann Neurol*, 18(2), 222-233.
- Garavan, H., Ross, T. J., Murphy, K., Roche, R. A., & Stein, E. A. (2002). Dissociable executive functions in the dynamic control of behavior: inhibition, error detection, and correction. *Neuroimage*, 17(4), 1820-1829.
- Georgiewa, P., Rzanny, R., Gaser, C., Gerhard, U. J., Vieweg, U., Freesmeyer, D., et al. (2002). Phonological processing in dyslexic children: a study combining functional imaging and event related potentials. *Neurosci Lett*, 318(1), 5-8.
- Gleitman, L. R., & Rozin, P. (1977). The structure and acquisition of reading I: Relations between orthographies and the structure of language. In *Toward a psychology of reading*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Gombert, J. (1990). *Le développement metalinguistique*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Gombert, J., & Peereman, R. (2001). Training children with artificial alphabet. *Psychology*, 8, 338-357.

- Habib, M. (2000). The neurological basis of developmental dyslexia: an overview and working hypothesis. *Brain*, 123 Pt 12, 2373-2399.
- Haist, F., Song, A. W., Wild, K., Faber, T. L., Popp, C. A., & Morris, R. D. (2001). Linking sight and sound: fMRI evidence of primary auditory cortex activation during visual word recognition. *Brain Lang*, 76(3), 340-350.
- Hanson, V. L. (1982). Short-term recall by deaf signers of American Sign Language: implications of encoding strategy for order recall. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*, 8(6), 572-583.
- Hanson, V. L. (1989). Phonology and reading: Evidence from profoundly deaf readers. In D. Shankweiler & I. Y. Liberman (Eds.), *Phonology and Reading Disability, Solving the Reading Puzzle* (pp. 69-89): The University of Michigan Press.
- Hanson, V. L., & Fowler, C. A. (1987). Phonological coding in word reading: evidence from hearing and deaf readers. *Mem Cognit*, 15(3), 199-207.
- Hanson, V. L., & McGarr, N. S. (1989). Rhyme generation by deaf adults. *J Speech Hear Res*, 32(1), 2-11.
- Hanson, V. L., Shankweiler, D., & Fischer, F. W. (1983). Determinants of spelling ability in deaf and hearing adults: access to linguistic structure. *Cognition*, 14(3), 323-344.
- Harris, M., & Beech, J. (1998). Implicit phonological awareness and early reading development in prelingually deaf children. *J Deaf Stud Deaf Educ*, 3(3), 205-216.
- Harris, M., & Moreno, C. (2004). Deaf children's use of phonological coding: evidence from reading, spelling, and working memory. *J Deaf Stud Deaf Educ*, 9(3), 253-268.
- Hascher, L., & Zacks, R. T. (1979). Automatic and effortful processes in memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, 108, 356-388.
- Hayes, P., & Arnold, P. (1992). Is hearing-impaired children's reading delayed or different? *Journal of Research in Reading*, 15(2), 104-116.
- Heim, S., Alter, K., Ischebeck, A. K., Amunts, K., Eickhoff, S. B., Mohlberg, H., et al. (2005). The role of the left Brodmann's areas 44 and 45 in reading words and pseudowords. *Brain Res Cogn Brain Res*, 25(3), 982-993.
- Hickok, G., & Poeppel, D. (2004). Dorsal and ventral streams: a framework for understanding aspects of the functional anatomy of language. *Cognition*, 92(1-2), 67-99.
- Hogaboam, T., & Perfetti, C. (1978). Reading skill and the role of verbal experience in decoding. *Journal of Educational Psychology*, 70, 717-729.
- Horwitz, B., Amunts, K., Bhattacharyya, R., Patkin, D., Jeffries, K., Zilles, K., et al. (2003). Activation of Broca's area during the production of spoken and signed language: a combined cytoarchitectonic mapping and PET analysis. *Neuropsychologia*, 41(14), 1868-1876.
- Howard, D., Patterson, K., Wise, R., Brown, W. D., Friston, K., Weiller, C., et al. (1992). The cortical localization of the lexicons. Positron emission tomography evidence. *Brain*, 115(Pt 6), 1769-1782.

- Iacoboni, M., Woods, R. P., Brass, M., Bekkering, H., Mazziotta, J. C., & Rizzolatti, G. (1999). Cortical mechanisms of human imitation. *Science*, 286(5449), 2526-2528.
- Ischebeck, A., Indefrey, P., Usui, N., Nose, I., Hellwig, F., & Taira, M. (2004). Reading in a regular orthography: an fMRI study investigating the role of visual familiarity. *J Cogn Neurosci*, 16(5), 727-741.
- Jobard, G., Crivello, F., & Tzourio-Mazoyer, N. (2003). Evaluation of the dual route theory of reading: a metaanalysis of 35 neuroimaging studies. *Neuroimage*, 20(2), 693-712.
- Jones, J. A., & Munhall, K. G. (1996). The Effects of Separating Auditory and Visual Sources on Audiovisual Integration of Speech. *Canadian Acoustics Journal*, 25, 13-19.
- Katz, L., Lee, C. H., Tabor, W., Frost, S. J., Mencl, W. E., Sandak, R., et al. (2005). Behavioral and neurobiological effects of printed word repetition in lexical decision and naming. *Neuropsychologia*, 43(14), 2068-2083.
- Kiehl, K. A., Liddle, P. F., & Hopfinger, J. B. (2000). Error processing and the rostral anterior cingulate: an event-related fMRI study. *Psychophysiology*, 37(2), 216-223.
- Kim, K. H., Relkin, N. R., Lee, K. M., & Hirsch, J. (1997). Distinct cortical areas associated with native and second languages. *Nature*, 388(6638), 171-174.
- Kintsch, W. (1988). The role of knowledge in discourse comprehension: a construction-integration model. *Psychol Rev*, 95(2), 163-182.
- Krakow, R. A., & Hanson, V. L. (1985). Deaf signers and serial recall in the visual modality: memory for signs, fingerspelling, and print. *Mem Cognit*, 13(3), 265-272.
- Kronbichler, M., Hutzler, F., Wimmer, H., Mair, A., Staffen, W., & Ladurner, G. (2004). The visual word form area and the frequency with which words are encountered: evidence from a parametric fMRI study. *Neuroimage*, 21(3), 946-953.
- LaSasso, C., Crain, K., & Leybaert, J. (2003). Rhyme generation in deaf students: the effect of exposure to cued speech. *J Deaf Stud Deaf Educ*, 8(3), 250-270.
- Lete, B., Sprenger-Charolles, L., & Cole, P. (2004). MANULEX: a grade-level lexical database from French elementary school readers. *Behav Res Methods Instrum Comput*, 36(1), 156-166.
- Lewkowicz, N. K. (1980). Phonemic awareness training: What to teach and how to teach it. *Journal of Educational Psychology*, 72, 686-700.
- Leybaert, J. (1998). Phonological representations in deaf children: the importance of early linguistic experience. *Scand J Psychol*, 39(3), 169-173.
- Leybaert, J. (2000). Phonology acquired through the eyes and spelling in deaf children. *J Exp Child Psychol*, 75(4), 291-318.
- Leybaert, J., & Alegria, J. (1993). Is word processing involuntary in deaf children? *British Journal of Developmental Psychology*, 11(1), 1-29.
- Leybaert, J., & Alegria, J. (1995). Spelling development in deaf and hearing children: Evidence for use of morpho-phonological regularities in French. *Reading & Writing*, 7, 89-109.

- Leybaert, J., Alegria, J., & Fonck, E. (1983). Automaticity in word recognition and in word naming by the deaf. *Cahiers de Psychologie Cognitive*, 3(3), 255-272.
- Leybaert, J., & Charlier, B. (1996). Visual speech in the head: the effect of cued-speech on rhyming, remembering, and spelling. *J Deaf Stud Deaf Educ*, 1(4), 234-248.
- Livingstone, M. S., Rosen, G. D., Drislane, F. W., & Galaburda, A. M. (1991). Physiological and anatomical evidence for a magnocellular defect in developmental dyslexia. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 88(18), 7943-7947.
- Lobrot, M. (1973). *Lire*. Paris: ESF.
- Locke, J. L. (1997). A theory of neurolinguistic development. *Brain Lang*, 58(2), 265-326.
- Lundberg, I., Olofsson, A., & Wall, S. (1980). Reading and spelling skills in the first school years predicted from phonemic awareness skills in kindergarten. *Scand J Psychol*, 21, 159-173.
- MacSweeney, M., Amaro, E., Calvert, G. A., Campbell, R., David, A. S., McGuire, P., et al. (2000). Silent speechreading in the absence of scanner noise: an event-related fMRI study. *Neuroreport*, 11(8), 1729-1733.
- Mann, V. A. (1984). Longitudinal prediction and prevention of early reading difficulty. *Annals of Dyslexia*, 34, 117-136.
- Mann, V. A., & Liberman, I. Y. (1984). Phonological awareness and verbal short-term memory. *J Learn Disabil*, 17(10), 592-599.
- Marschark, M., & Harris, M. (1995). Success and failure in learning to read: The special case of deaf children. In J. Oakhill & C. Cornoldi (Eds.), *Reading comprehension disabilities* (pp. 279-300). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Marslen-Wilson, W., Nix, A., & Gaskell, M. G. (1995). Phonological variation in lexical access: Abstractness and English place assimilation. *Language and Cognitive Processes*, 10(3), 285-308.
- Mayberry, R. I. (1993). First-language acquisition after childhood differs from second-language acquisition: the case of American Sign Language. *J Speech Hear Res*, 36(6), 1258-1270.
- Mayberry, R. I., Lock, E., & Kazmi, H. (2002). Linguistic ability and early language exposure. *Nature*, 417(6884), 38.
- Mazoyer, B. (2001). *L'imagérie cérébrale fonctionnelle*. Paris: Puf.
- McCandliss, B. D., Cohen, L., & Dehaene, S. (2003). The visual word form area: expertise for reading in the fusiform gyrus. *Trends Cogn Sci*, 7(7), 293-299.
- 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(3), 293-303.
- McGurk, H., & MacDonald, J. (1976). Hearing lips and seeing voices. *Nature*, 264(5588), 746-748.

- Mechelli, A., Penny, W. D., Price, C. J., Gitelman, D. R., & Friston, K. J. (2002). Effective connectivity and intersubject variability: using a multisubject network to test differences and commonalities. *Neuroimage*, 17(3), 1459-1469.
- Merrills, J. D., Underwood, G., & Wood, D. J. (1994). The word recognition skills of profoundly, prelingually deaf children. *British Journal of Developmental Psychology*, 12(3), 365-384.
- Meyer, D. E., Schvaneveldt, R. W., & Ruddy, M. G. (1974). Functions of graphemic and phonemic codes in visual word-recognition. *Mem Cognit*, 2, 309-321.
- Milham, M. P., Banich, M. T., Webb, A., Barad, V., Cohen, N. J., Wszalek, T., et al. (2001). The relative involvement of anterior cingulate and prefrontal cortex in attentional control depends on nature of conflict. *Brain Res Cogn Brain Res*, 12(3), 467-473.
- Mills, A. E. (1987). The development of phonology in blind child. In B. Dodd & B. Campbell (Eds.), *Hearing by eye: The psychology of lipreading*. London: Lawrence Erlbaum.
- Mohr, J. P., Pessin, M. S., Finkelstein, S., Funkenstein, H. H., Duncan, G. W., & Davis, K. R. (1978). Broca aphasia: pathologic and clinical. *Neurology*, 28(4), 311-324.
- Moore, C. J., & Price, C. J. (1999). Three distinct ventral occipitotemporal regions for reading and object naming. *Neuroimage*, 10(2), 181-192.
- Munhall, K. G., Gribble, P., Sacco, L., & Ward, M. (1996). Temporal constraints on the McGurk effect. *Percept Psychophys*, 58(3), 351-362.
- Munhall, K. G., & Vatikiotis-Bateson, E. (1998). The moving face during speech communication. In B. Campbell, B. Dodd & D. Burnham (Eds.), *Hearing by eye II: Advances in the psychology of speechreading and auditory-visual speech* (pp. 123-139). Hove, UK: Psychology Press.
- Musselman, C. (2000). How Do Children Who Can't Hear Learn to Read an Alphabetic Script? A Review of the Literature on Reading and Deafness. *J Deaf Stud Deaf Educ*, 5(1), 9-31.
- Neville, H. J., & Bavelier, D. (1998). Neural organization and plasticity of language. *Curr Opin Neurobiol*, 8(2), 254-258.
- Neville, H. J., Bavelier, D., Corina, D., Rauschecker, J., Karni, A., Lalwani, A., et al. (1998). Cerebral organization for language in deaf and hearing subjects: biological constraints and effects of experience. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 95(3), 922-929.
- Nobre, A. C., Allison, T., & McCarthy, G. (1994). Word recognition in the human inferior temporal lobe. *Nature*, 372(6503), 260-263.
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97-113.
- Paap, K. R., & Noel, R. W. (1991). Dual route models of print to sound: Still a good horse race. *Psychological Research*, 53, 13-24.
- Pallier, C. (2000). Word recognition: Do we need phonological representations? In A. Cutler, J. M. McQueen & R. Zondervan (Eds.), *Proceedings of the Workshop on the Spoken Word Access Processes (SWAP)* (pp. 159-162). Nijmegen, The Netherlands: Max-Planck Institute for Psycholinguistics.



- Paulesu, E., Frith, U., Snowling, M., Gallagher, A., Morton, J., Frackowiak, R. S., et al. (1996). Is developmental dyslexia a disconnection syndrome? Evidence from PET scanning. *Brain*, 119(Pt 1), 143-157.
- Paulesu, E., Perani, D., Blasi, V., Silani, G., Borghese, N. A., De Giovanni, U., et al. (2003). A functional-anatomical model for lipreading. *J Neurophysiol*, 90(3), 2005-2013. Epub 2003 May 2015.
- Penny, W. D., Stephan, K. E., Mechelli, A., & Friston, K. J. (2004). Comparing dynamic causal models. *Neuroimage*, 22(3), 1157-1172.
- Perani, D., Dehaene, S., Grassi, F., Cohen, L., Cappa, S. F., Dupoux, E., et al. (1996). Brain processing of native and foreign languages. *Neuroreport*, 7(15-17), 2439-2444.
- Perfetti, C. (1992). The representation problem in reading acquisition. In P. Gough, L. C. Ehri & R. Treiman (Eds.), *Reading acquisition* (pp. 107-143). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Perfetti, C. (1999). Comprehending written language: A blueprint of the reader. In C. Brown & P. Hagoort (Eds.), *The neurocognition of language* (pp. 167-208). Oxford, UK: Oxford University Press.
- Perfetti, C., & Hogaboam, T. (1975). Relationship between single word decoding and reading comprehension skill. *Journal of Educational Psychology*, 67, 461-469.
- Perfetti, C., & Sandak, R. (2000). Reading optimally builds on spoken language: implications for deaf readers. *J Deaf Stud Deaf Educ*, 5(1), 32-50.
- 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(6157), 585-589.
- Plaut, D. C., McClelland, J. L., Seidenberg, M. S., & Patterson, K. (1996). Understanding normal and impaired word reading: computational principles in quasi-regular domains. *Psychol Rev*, 103(1), 56-115.
- Poldrack, R. A., Temple, E., Protopapas, A., Nagarajan, S., Tallal, P., Merzenich, M., et al. (2001). Relations between the neural bases of dynamic auditory processing and phonological processing: evidence from fMRI. *J Cogn Neurosci*, 13(5), 687-697.
- Poldrack, R. A., & Wagner, A. D. (2004). What can Neuroimaging tell us about the mind? *Current Directions in Psychological Science*, 13(5), 177-181.
- 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(1), 15-35.
- Polk, T. A., Stallcup, M., Aguirre, G. K., Alsop, D. C., D'Esposito, M., Detre, J. A., et al. (2002). Neural specialization for letter recognition. *J Cogn Neurosci*, 14(2), 145-159.
- Price, C. J. (2000). The anatomy of language: contributions from functional neuroimaging. *J Anat*, 197 Pt 3, 335-359.
- Price, C. J., & Friston, K. J. (1999). Scanning patients with tasks they can perform. *Hum Brain Mapp*, 8(2-3), 102-108.

- 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(Pt 6), 1255-1269.
- Pugh, K. R., Mencl, W. E., Jenner, A. R., Katz, L., Frost, S. J., Lee, J. R., et al. (2000). Functional neuroimaging studies of reading and reading disability (developmental dyslexia). *Ment Retard Dev Disabil Res Rev*, 6(3), 207-213.
- Pugh, K. R., Mencl, W. E., Jenner, A. R., Katz, L., Frost, S. J., Lee, J. R., et al. (2001). Neurobiological studies of reading and reading disability. *J Commun Disord*, 34(6), 479-492.
- Pugh, K. R., Shaywitz, B. A., Shaywitz, S. E., Shankweiler, D. P., Katz, L., Fletcher, J. M., et al. (1997). Predicting reading performance from neuroimaging profiles: the cerebral basis of phonological effects in printed word identification. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 23(2), 299-318.
- Quigley, S. (1982). Reading achievement and special reading materials. *Volta Review*, 84(5), 95-106.
- Rennes, & Kourowski. (2000). *Test D2000*. Paris: Les Éditions du Centre de Psychologie Appliquée.
- Ridderinkhof, K. R., Ullsperger, M., Crone, E. A., & Nieuwenhuis, S. (2004). The role of the medial frontal cortex in cognitive control. *Science*, 306(5695), 443-447.
- Riesenhuber, M., & Poggio, T. (1999). Hierarchical models of object recognition in cortex. *Nat Neurosci*, 2(11), 1019-1025.
- Röder, B., Rosler, F., & Neville, H. J. (2000). Event-related potentials during auditory language processing in congenitally blind and sighted people. *Neuropsychologia*, 38(11), 1482-1502.
- Rorden, C., & Brett, M. (2000). Stereotaxic display of brain lesions. *Behav Neurol*, 12(4), 191-200.
- Rosen, B. R., Buckner, R. L., & Dale, A. M. (1998). Event-related functional MRI: past, present, and future. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 95(3), 773-780.
- Rumsey, J. M., Andreason, P., Zametkin, A. J., Aquino, T., King, A. C., Hamburger, S. D., et al. (1992). Failure to activate the left temporoparietal cortex in dyslexia. An oxygen 15 positron emission tomographic study. *Arch Neurol*, 49(5), 527-534.
- Rumsey, J. M., Donohue, B. C., Brady, D. R., Nace, K., Giedd, J. N., & Andreason, P. (1997). A magnetic resonance imaging study of planum temporale asymmetry in men with developmental dyslexia. *Arch Neurol*, 54(12), 1481-1489.
- Rumsey, J. M., Horwitz, B., Donohue, B. C., Nace, K., Maisog, J. M., & Andreason, P. (1997). Phonological and orthographic components of word recognition. A PET-rCBF study. *Brain*, 120(Pt 5), 739-759.
- Rumsey, J. M., Horwitz, B., Donohue, B. C., Nace, K. L., Maisog, J. M., & Andreason, P. (1999). A functional lesion in developmental dyslexia: left angular gyral blood flow predicts severity. *Brain Lang*, 70(2), 187-204.

- Rumsey, J. M., Nace, K., Donohue, B., Wise, D., Maisog, J. M., & Andreason, P. (1997). A positron emission tomographic study of impaired word recognition and phonological processing in dyslexic men. *Arch Neurol*, *54*(5), 562-573.
- Samar, V. J., Parasnis, I., & Berent, G. P. (2002). Deaf poor readers' pattern reversal visual evoked potentials suggest magnocellular system deficits: implications for diagnostic neuroimaging of dyslexia in deaf individuals. *Brain Lang*, *80*(1), 21-44.
- Schildroth, A. N., & Hotto, S. A. (1996). Annual survey of deaf and hard of hearing children and youth: Changes in student characteristics. *Am Ann Deaf*, *141*, 68-71.
- Seidenberg, M. S., & McClelland, J. L. (1989). A distributed, developmental model of word recognition and naming. *Psychol Rev*, *96*(4), 523-568.
- Sekiyama, K., Kanno, I., Miura, S., & Sugita, Y. (2003). Auditory-visual speech perception examined by fMRI and PET. *Neurosci Res*, *47*(3), 277-287.
- Shankweiler, D., Liberman, I. Y., Mark, L. S., Fowler, C. A., & Fischer, F. W. (1979). The speech code and learning to read. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, *5*, 531-545.
- Shaywitz, B. A., Shaywitz, S. E., Pugh, K. R., Mencl, W. E., Fulbright, R. K., Skudlarski, P., et al. (2002). Disruption of posterior brain systems for reading in children with developmental dyslexia. *Biol Psychiatry*, *52*(2), 101-110.
- Shaywitz, S. E., Shaywitz, B. A., Pugh, K. R., Fulbright, R. K., Constable, R. T., Mencl, W. E., et al. (1998). Functional disruption in the organization of the brain for reading in dyslexia. *Proc Natl Acad Sci U S A*, *95*(5), 2636-2641.
- Simos, P. G., Fletcher, J. M., Bergman, E., Breier, J. I., Foorman, B. R., Castillo, E. M., et al. (2002). Dyslexia-specific brain activation profile becomes normal following successful remedial training. *Neurology*, *58*(8), 1203-1213.
- Simos, P. G., Fletcher, J. M., Foorman, B. R., Francis, D. J., Castillo, E. M., Davis, R. N., et al. (2002). Brain activation profiles during the early stages of reading acquisition. *J Child Neurol*, *17*(3), 159-163.
- Spoehr, K. T., & Corin, W. J. (1978). The stimulus suffix effect as a memory coding phenomenon. *Mem Cognit*, *6*(6), 583-589.
- Stanovich, K. E. (1982a). Individual differences in the cognitive processes of reading: I. Word decoding. *J Learn Disabil*, *15*(8), 485-493.
- Stanovich, K. E. (1982b). Individual differences in the cognitive processes of reading: II. Text-level processes. *J Learn Disabil*, *15*(9), 549-554.
- Stanovich, K. E. (1985). Cognitive processes and the reading problems of learning disabled children: Evaluating the assumption of specificity. In J. K. Torgesen & E. C. Wong (Eds.), *Psychological and educational perspectives on learning disabilities* (pp. 87-132). New York: Academic Press.
- Sternberg, S. (1969). The Discovery of Processing Stages: Extension of Donders' Method. *Acta Psychologica*, *30*, 276-315.
- Sterne, A., & Goswami, U. (2000). Phonological awareness of syllables, rhymes, and phonemes in deaf children. *J Child Psychol Psychiatry*, *41*(5), 609-625.

- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18, 643-661.
- Sumbly, W. H., & Pollack, I. (1954). Visual Contribution to Speech Intelligibility in Noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 26, 212-215.
- Summerfield, Q., & McGrath, M. (1984). Detection and resolution of audio-visual incompatibility in the perception of vowels. *Q J Exp Psychol A*, 36(1), 51-74.
- Talairach, J., & Tournoux, P. (1988). *Co-planar-stereotaxic atlas of the human brain 3-dimensional-proportional system: an approach to cerebral imaging*. Stuttgart: George Thieme Verlag.
- 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(6), 671-676.
- Torgesen, J. K. (1977a). Memorization processes in reading-disabled children. *Journal of Educational Psychology*, 69, 571-578.
- Torgesen, J. K. (1977b). The role of non-specific factors in the task performance of learning disabled children: A theoretical assessment. *Journal of Learning Disabilities*, 10, 27-34.
- Torgesen, J. K., & Houck, D. (1980). Processing deficiencies of learning-disabled children who perform poorly on the digit span test. *Journal of Educational Psychology*, 72, 141-160.
- Tzourio-Mazoyer, N., Landeau, B., Papathanassiou, D., Crivello, F., Etard, O., Delcroix, N., et al. (2002). Automated anatomical labeling of activations in SPM using a macroscopic anatomical parcellation of the MNI MRI single-subject brain. *Neuroimage*, 15(1), 273-289.
- Ullsperger, M., & von Cramon, D. Y. (2004). Neuroimaging of performance monitoring: error detection and beyond. *Cortex*, 40(4-5), 593-604.
- Van Dijk, T. A., & Kintsch, W. (1983). *Strategies of discourse comprehension*. New York: Academic Press.
- 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(6597), 254-256.
- Vigneau, M., Jobard, G., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyer, N. (2005). Word and non-word reading: what role for the Visual Word Form Area? *Neuroimage*, 27(3), 694-705.
- Wagner, R. K., & Torgesen, J. K. (1987). The Nature of Phonological Processing and Its Causal Role in the Acquisition of Reading Skills. *Psychological Bulletin*, 101(2), 192-212.
- Walter, G. G. (1978). Lexical abilities of hearing and hearing-impaired children. *Am Ann Deaf*, 123(8), 976-982.
- Warrington, E. K., & Shallice, T. (1980). Word-form dyslexia. *Brain*, 103(1), 99-112.

- Waters, G. S., & Doehring, D. (1990). Reading acquisition in congenitally deaf children who communicate orally: Insights from an analysis of component reading, language and memory skills. In T. Carr & B. Levy (Eds.), *Reading and its development: Components skills approaches* (pp. 323-373). San Diego: Academic Press.
- Waters, G. S., & Seidenberg, M. S. (1985). Spelling-sound effects in reading: time-course and decision criteria. *Mem Cognit*, *13*(6), 557-572.
- Waters, G. S., Seidenberg, M. S., & Bruck, M. (1984). Children's and adults' use of spelling-sound information in three reading tasks. *Mem Cognit*, *12*(3), 293-305.
- WHO. (1993). *The international classification of diseases* (Vol. 10). Geneva: World Health Organization.
- Wise, R., Chollet, F., Hadar, U., Friston, K., Hoffner, E., & Frackowiak, R. (1991). Distribution of cortical neural networks involved in word comprehension and word retrieval. *Brain*, *114* ( Pt 4), 1803-1817.
- Woods, R. P., Cherry, S. R., & Mazziotta, J. C. (1992). Rapid automated algorithm for aligning and reslicing PET images. *J Comput Assist Tomogr*, *16*(4), 620-633.
- Woods, R. P., Dapretto, M., Sicotte, N. L., Toga, A. W., & Mazziotta, J. C. (1999). Creation and use of a Talairach-compatible atlas for accurate, automated, nonlinear intersubject registration, and analysis of functional imaging data. *Hum Brain Mapp*, *8*(2-3), 73-79.
- Worsley, K. J., Poline, J. B., Friston, K. J., & Evans, A. C. (1997). Characterizing the response of PET and fMRI data using multivariate linear models. *Neuroimage*, *6*(4), 305-319.
- Yehia, H., Rubin, P., & Vatikiotis-Bateson, E. (1998). Quantitative association of vocal-tract and facial behavior. *Speech Communication*, *26*, 23-43.
- Yetkin, O., Zerrin Yetkin, F., Haughton, V. M., & Cox, R. W. (1996). Use of functional MR to map language in multilingual volunteers. *AJNR Am J Neuroradiol*, *17*(3), 473-477.

# TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>13</b>
<b>A PARTIE THEORIQUE.....</b>	<b>17</b>
<b>A.1 LA PHONOLOGIE ET LES PHONÈMES.....</b>	<b>17</b>
<b>A.2 RELATION ENTRE PHONOLOGIE ET LECTURE.....</b>	<b>19</b>
A.2.1 Conscience phonologique et lecture.....	19
A.2.2 Conversion graphophonologique lexicale et lecture.....	20
A.2.3 Relation entre conscience phonologique et la CGP.....	21
A.2.4 La mémoire de travail et la lecture.....	21
A.2.5 Relation entre conscience phonologique et lecture chez le sourd.....	23
<b>A.3 PHONOLOGIE ET LECTURE LABIALE.....</b>	<b>25</b>
A.3.1 La perception multimodale de la parole.....	25
A.3.2 La phonologie acquise à travers la modalité visuelle : le langage parlé complété.....	27
<b>A.4 MODÈLE À DEUX VOIES DE LA LECTURE.....</b>	<b>29</b>
A.4.1 Description du modèle.....	29
A.4.2 Développement de la lecture dans le cadre du modèle de lecture à deux voies.....	32
<b>A.5 LECTURE ET NEUROIMAGERIE.....</b>	<b>34</b>
A.5.1 L'utilisation des données de la Neuroimagerie.....	35
A.5.2 Bases neuroanatomiques de la lecture.....	36
A.5.3 Neuroanatomie fonctionnelle du modèle de lecture à deux voies.....	39
A.5.4 Neuroanatomie de la lecture labiale et la voie pariéto-frontale.....	44
<b>A.6 LE SOURD ET LA LECTURE .....</b>	<b>47</b>
A.6.1 Les sourds, utilisent-ils la phonologie ?.....	47
A.6.1.1 <i>En faveur de l'existence d'un traitement phonologique chez le sourd.....</i>	<i>47</i>
A.6.1.1.1 Mesures implicites de la phonologie.....	48
A.6.1.1.2 Mesures explicites de la phonologie.....	50
A.6.1.2 <i>Contre l'usage de la phonologie chez le sourd.....</i>	<i>52</i>
A.6.1.2.1 Tâches de décision lexicale.....	53
A.6.1.2.2 Tâches d'orthographe.....	54
A.6.1.3 <i>Codage phonologique ou non chez le sourd ? A la recherche d'une explication.....</i>	<i>55</i>
A.6.2 La période sensible pour l'apprentissage de la langue.....	60
A.6.3 L'importance de la langue des signes pour l'acquisition de la langue orale.....	61
<b>A.7 HYPOTHESES DE TRAVAIL .....</b>	<b>64</b>

<b>B</b>	<b>PARTIE EXPERIMENTALE.....</b>	<b>65</b>
<b>B.1</b>	<b>EXPERIENCE N° 1 : PROTOCOLE EN BLOC.....</b>	<b>67</b>
B.1.1	Méthode générale .....	67
B.1.1.1	<i>Sujets</i> .....	67
B.1.1.2	<i>Procédure</i> .....	68
B.1.1.2.1	Protocole en IRMf .....	68
B.1.1.2.2	Jugement visuel de rimes .....	69
B.1.1.2.3	Décision lexicale .....	70
B.1.1.3	<i>Entraînement</i> .....	71
B.1.2	Analyse n° 1 : usage de la phonologie chez le sourd ? .....	73
B.1.2.1	<i>Introduction</i> .....	73
B.1.2.2	<i>Méthode d'analyse</i> .....	76
B.1.2.2.1	Catégorisation des erreurs .....	76
B.1.2.3	<i>Résultats</i> .....	78
B.1.2.3.1	Analyse de la performance.....	78
B.1.2.3.2	Analyse des temps de réponse.....	80
B.1.2.3.3	Catégorisation de l'erreur : erreurs orthographique ou phonologique.....	81
B.1.2.4	<i>Discussion</i> .....	84
B.1.3	Analyse n° 2 : Une surutilisation de la voie phonologique ? .....	87
B.1.3.1	<i>Introduction</i> .....	87
B.1.3.2	<i>Méthodes d'analyse</i> .....	93
B.1.3.2.1	Sujets .....	93
B.1.3.2.2	Paramètres d'acquisition des images et analyse de données .....	94
B.1.3.2.2.1	Analyse du cerveau entier .....	94
B.1.3.2.2.2	Analyse en régions d'intérêt .....	96
B.1.3.3	<i>Résultats</i> .....	99
B.1.3.3.1	Tâche de jugement visuel de rimes.....	99
B.1.3.3.1.1	Analyse du cerveau entier chez les sourds et les entendants.....	99
B.1.3.3.1.2	Analyse de contraste entre groupes.....	102
B.1.3.3.1.2.1	<i>Analyse du cerveau entier</i> .....	102
B.1.3.3.1.2.2	<i>Analyse en régions d'intérêt</i> .....	104
B.1.3.3.2	Décision lexicale .....	107
B.1.3.3.2.1	Analyse du cerveau entier chez les sourds et les entendants.....	107
B.1.3.3.2.2	Analyse de contraste entre groupes.....	110
B.1.3.3.2.2.1	<i>Analyse du cerveau entier</i> .....	110
B.1.3.3.2.2.2	<i>Analyse en régions d'intérêt</i> .....	111
B.1.3.4	<i>Discussion</i> .....	113
B.1.4	Analyse n° 3 : le lecteur sourd, emploie t-il la voie phonologique de façon efficace ? .....	117
B.1.4.1	<i>Introduction</i> .....	117
B.1.4.2	<i>Méthodes de l'analyse</i> .....	118
B.1.4.3	<i>Résultats</i> .....	118

B.1.4.4	<i>Discussion.....</i>	120
B.1.5	Quelques résultats complémentaires autour du GFI .....	123
B.1.5.1	<i>Un rôle de pivot du GFI gauche ? : une étude de connectivité.....</i>	123
	<i>Proposition de recherche n° 1.....</i>	128
B.1.5.2	<i>L'activation du GFI droit est-elle liée à la difficulté ? : des données de corrélation...</i>	129
	<i>Proposition de recherche n° 2.....</i>	130
<b>B.2</b>	<b>EXPÉRIENCE ÉVÉNEMENTIELLE : UNE AMÉLIORATION PAR RAPPORT À</b>	
	<b>L'EXPÉRIENCE EN BLOC .....</b>	<b>131</b>
B.2.1	Introduction : nouvelles hypothèses.....	131
B.2.2	Méthodes de l'expérience événementielle.....	134
B.2.2.1	<i>La pseudo-aléatorisation du signal .....</i>	<i>134</i>
B.2.2.2	<i>Caractéristiques des deux tâches.....</i>	<i>136</i>
<b>C</b>	<b>DISCUSSION GENERALE .....</b>	<b>139</b>
<b>C.1</b>	<b>UN TRAITEMENT CONTRÔLÉ CHEZ LE SOURD .....</b>	<b>139</b>
	<i>Proposition de recherche n° 3.....</i>	143
<b>C.2</b>	<b>UN MODÈLE DE DEUXIÈME LANGUE CHEZ LE SOURD .....</b>	<b>143</b>
	<i>Proposition de recherche n° 4.....</i>	145
<b>C.3</b>	<b>UNE VOIE FRONTO-PARIETALE DES REPRESENTATIONS ARTICULATOIRES .....</b>	<b>145</b>
	<i>Proposition de recherche n° 5.....</i>	146
	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>147</b>
	<b>RÉFÉRENCES.....</b>	<b>151</b>
	<b>TABLE DES MATIERES.....</b>	<b>166</b>



## ANNEXES

### 1. Stimuli employés dans le jugement visuel de la rime de l'expérience en bloc

<b>RH</b>	<b>NRNH</b>	<b>RNH</b>	<b>NRH</b>
pelle-belle	miel-page	album-somme	bille-mille
sac-lac	taupe-boule	bœuf-neuf	bille-ville
jeux-feux	tarte-lune	brique-tic	quille-mille
joue-roue	natte-pomme	brun-main	donc-tronc
mouche-louche	glace-mer	femme-lame	fille-ville
fouille-rouille	pouce-beurre	fort-porc	pays-gays
rhume-fume	lévre-mouche	guère-terre	mars-épars
tasse-masse	pain-lit	maire-terre	tabac-hamac
tard-lard	cri-trois	navet-balai	fusil-avril
fille-quille	sol-four	nœud-peu	six-prix
boule-moule	choc-cri	noix-doigt	tapis-iris
sel-gel	deux-six	pain-fin	stop-trop
colle-folle	bague-coq	plante-menthe	prix-dix
livre-givre	dent-scie	plaque-lac	hiver-boucher
rousse-mousse	neuf-tigre	plomb-blond	
seuil-deuil	chat-chien	poêle-toile	
caille-paille	jaune-rouge	pull-mule	
coing-poing	nez-pied	riz-lit	
fièvre-lièvre	cube-patte	sceau-faux	
péril-avril	poule-bus	sept-cette	
tresse-messe	natte-pince	site-mythe	
pierre-lierre	moine-char	sourd-four	
chien-lien	cadre-bol	tard-mare	
nef-bref	poire-foule	tente-plante	
tâche-lâche	blond-gris	treuil-feuille	

2. Stimuli employé dans la tâche de décision lexicale de l'expérience en bloc

<b>Mots haute frequence</b>	<b>Mots basse frequence</b>	<b>Pseudomots</b>
mal	usine	laisir
point	vallée	locet
mort	couple	bolue
droite	conflit	faret
temps	soulier	fasil
monde	décor	plite
main	est	tolie
mot	masque	bolue
esprit	oeuf	avour
tête	paille	gepou
coeur	tapis	celis
idée	parc	juil
nuit	culte	sapo
soir	nerf	choat
maison	pomme	egoise
père	lunette	tav
terre	lunette	tikot
visage	camion	apri
place	lapin	armoe
état	crayon	brult
regard	sapin	etuge
forme	narine	gors
plein	cabane	burbe
besoin	lacet	ecale
livre	briquet	fieu

3. Stimuli employés dans le jugement visuel de rimes de l'expérience événementielle

<b>RH</b>	<b>NRH</b>
achat-plat	achat-mat
achat-format	amer-laquer
amer-charter	atlas-repas
amis-colis	avril-outil
amis-brebis	avril-gentil
amis-tapis	baril-fusil
avril-civil	baril-gentil
baril-avril	basket-trajet
baril-chenil	basket-poulet
basket-rocket	basket-duvet
basket-gadget	bille-mille
bille-quille	boucher-amer
boucher-pêcher	boucher-super
boucher-souper	boucher-docker
boucher-rocher	brebis-métis
brebis-verniss	briquet-basket
briquet-poulet	briquet-gadget
briquet-trajet	cadenas-hélas
cadenas-repas	charter-goûter
cadenas-verglas	charter-souper
chenil-avril	chenil-outil
civil-baril	civil-gentil
civil-profil	civil-outil
civil-chenil	civil-fusil
coulis-colis	colis-iris
coulis-brebis	coulis-pastis
debout-surtout	coulis-métis
docker-enfer	docker-rocher
docker-charter	enfer-boucher
docker-joker	estomac-hamac
duvet-poulet	fille-ville
duvet-briquet	format -transat
duvet-trajet	fusil-avril
enfer-amer	fusil-chenil
fille-bille	gadget-trajet
fusil-gentil	gadget-duvet

gadget-rocket	galop-stop
garder-boucher	gentil-chenil
garder-rocher	goûter-enfer
gentil-outil	gratis-brebis
goûter-rocher	gratis-amis
goûter-boucher	hiver-boucher
gratis-pastis	iris-amis
hélas-atlas	joker-laquer
hiver-amer	lac-tabac
hiver-enfer	laquer-charter
hiver-leader	leader-garder
iris-gratis	mandat-transat
iris-pastis	maquis-pastis
joker-charter	mazout-debout
lac-hamac	métis-colis
lac-sac	métis-maquis
laquer-rocher	mille-fille
leader-amer	outil-baril
mandat-plat	partout-mazout
mandat-achat	pastis-vernis
mandat-soldat	pastis-colis
maquis-brebis	pêcher-hiver
maquis-tapis	plat-mat
maquis-colis	plat-transat
mat-transat	poulet-gadget
mazout-scout	profil-fusil
métis-gratis	quille-mille
métis-iris	repas-hélas
mot-tricot	rocher-hiver
outil-fusil	rocher-enfer
partout-debout	rocher-super
pastis-métis	scout-debout
poulet-trajet	sirop-stop
profil-avril	soldat-transat
profil-baril	souper-amer
quille-fille	spot-sabot
repas-verglas	spot-tricot
rocher-pêcher	spot-mot
sabot-tricot	stop-trop
sac-hamac	surtout-mazout

sirop-trop  
sirop-galop  
super-hiver  
tabac-estomac  
tapis-brebis  
trop-galop  
vernis-coulis  
vernis-colis  
ville-mille

tabac-sac  
tabac-hamac  
tapis-iris  
trajet-rocket  
verglas-hélas  
verglas-atlas  
vernis-métis  
ville-bille  
ville-quille