

Université de Montréal

**Localisation des aires cérébrales impliquées dans le rappel de mots :  
Validation d'un protocole d'imagerie optique**

par  
Mélanie Lefrançois

École d'orthophonie et d'audiologie  
Faculté de médecine

Mémoire présenté à la Faculté de médecine  
en vue de l'obtention du grade de M.Sc. en Sciences biomédicales

Novembre, 2013

© Mélanie Lefrançois, 2013

## Résumé

Jusqu'à récemment, les patients souffrant d'épilepsie réfractaire aux traitements médicamenteux étaient destinés à un avenir incertain. Le recours à la chirurgie comme traitement alternatif offre l'espoir de mener un jour une vie normale. Pour déterminer si un patient peut bénéficier d'une intervention chirurgicale, une évaluation complète est cruciale. Les méthodes d'évaluation préchirurgicale ont connu des progrès importants au cours des dernières décennies avec le perfectionnement des techniques d'imagerie cérébrale. Parmi ces techniques, la spectroscopie proche infrarouge (SPIR), aussi connue sous le nom d'imagerie optique, présente de nombreux avantages (coût, mobilité du participant, résolution spatiale et temporelle, etc.). L'objectif principal de cette étude est de développer un protocole d'évaluation préchirurgicale de la mémoire. Une tâche de mémoire verbale incluant l'encodage, le rappel immédiat et le rappel différé de listes de mots a été administrée à dix adultes sains lors d'un enregistrement en imagerie optique. Les résultats obtenus suggèrent l'activation bilatérale des aires préfrontales antérieures et dorsolatérales ainsi que des aires temporales antérieures et moyennes. Les aires préfrontales et temporales antérieures semblent modulées par les différents processus mnésiques et la position du rappel dans le temps. La première fois qu'une liste est rappelée, l'activité hémodynamique est plus élevée que lors des rappels subséquents, et ce, davantage dans l'hémisphère gauche que dans l'hémisphère droit. Cette étude constitue la première étape dans le processus de validation du protocole à des fins cliniques auprès de patients épileptiques.

**Mots-clés** : imagerie optique, spectroscopie proche infrarouge, mémoire, rappel verbal, cortex préfrontal, lobe temporal, encodage, récupération.

## **Abstract**

Until recently, patients with epilepsy refractory to drug treatments were intended to an uncertain future. Surgery as an alternative treatment offers hope to, one day, lead a normal life. In order to determine if a patient may benefit from a surgical intervention, a complete evaluation is essential. With the advancements in brain imagery techniques over the last few decades, preoperative evaluation methods have seen important progress. Among these techniques, near infrared spectroscopy (NIRS), also known as optical imaging, presents numerous advantages (cost, participant mobility, spatial and temporal resolution, etc.). The purpose of this study is to develop a preoperative evaluation protocol for memory assessment. During a NIRS recording, a verbal memory task including encoding, immediate and delayed free-recall of a list of words was administered to ten healthy adults. The results obtained revealed bilateral activation of anterior and dorsolateral prefrontal areas as well as anterior and median temporal areas. Prefrontal and anterior temporal areas seemed to be regulated by different memory processes and the recall location in time. The first time that a list is recalled, increased hemodynamic activity is observed in comparison to subsequent recalls, with a greater activity in the left hemisphere than in the right hemisphere. This study constitutes the first step in the validation process of the protocol for clinical needs among epileptic patients.

**Keywords** : optical imaging, near infrared spectroscopy, memory, verbal recall, prefrontal cortex, temporal lobe, encoding, retrieval

## Table des matières

Liste des tableaux.....	v
Liste des figures.....	vi
Remerciements.....	viii
Liste des abréviations et sigles.....	x
Chapitre 1 : INTRODUCTION.....	1
1.1 Problématique.....	2
1.1.1 Traitement chirurgical de l'épilepsie.....	2
1.1.2 Test à l'amobarbital intracarotidien (test de Wada).....	4
1.1.3 Les techniques d'évaluation non invasives.....	4
1.1.4 L'imagerie optique.....	5
1.2 Objectifs et hypothèses.....	7
Chapitre 2 : MÉTHODOLOGIE.....	10
2.1 Participants.....	11
2.2 Stimuli.....	11
2.2.1 Stimuli verbaux.....	11
2.2.2 Stimuli non verbaux.....	13
2.3 Tâches et procédure.....	14
2.4 Acquisition des données.....	18
2.5 Traitement des données.....	19
2.6 Analyses statistiques.....	20
Chapitre 3 : RÉSULTATS.....	21
3.1 Données comportementales.....	22
3.1.1 Performances.....	22
3.1.2 Types d'erreurs.....	24

3.1.3 Effet de primauté et de récence .....	25
3.2 Données hémodynamiques .....	26
3.2.1 Corrélation.....	26
3.2.2 Index de latéralité .....	26
3.2.3 Analyses de groupe.....	28
 Chapitre 4 : DISCUSSION.....	 37
4.1 Performances.....	38
4.1.1 Primauté et récence.....	39
4.2 Aires cérébrales activées et latéralisation .....	40
4.2.1 Latéralisation .....	43
4.3 Protocole d'évaluation pré-chirurgicale .....	45
4.4 Limites de la SPIR.....	46
4.5 Conclusion .....	47
 RÉFÉRENCES .....	 48
 Annexe A.....	 xii
Annexe B .....	xiv

## Liste des tableaux

**Tableau I.** Listes de mots employés lors de la tâche verbale ..... 13

**Tableau II.** Nombre de bonnes réponses (sur un maximum de 12) pour chaque participant selon la liste rappelée et le type de rappel effectué. .... 22

**Tableau III.** Types d'erreurs commises par chaque participant selon le délai du rappel ..... 25

## Liste des figures

<b>Figure 1.</b> Exemple d'une image présentée lors de la tâche non verbale et les choix de réponses y étant associés .....	14
<b>Figure 2.</b> Déroulement des blocs.....	15
<b>Figure 3A.</b> Déroulement d'un bloc de la tâche de mémoire verbale, incluant une reconnaissance différée des images présentées au bloc précédent .....	17
<b>Figure 3B.</b> Déroulement d'un bloc de la tâche de mémoire non verbale, incluant un rappel différé des mots présentés au bloc précédent.....	17
<b>Figure 4.</b> Couverture de l'enregistrement en imagerie optique et position des détecteurs selon les différentes régions du système 10-20 .....	18
<b>Figure 5.</b> Nombre de mots correctement rappelés pour chaque liste selon le moment du rappel.....	23
<b>Figure 6.</b> Index de latéralité pour chaque participant lors de a) l'encodage, b) du rappel immédiat et c) du rappel différé.....	27
<b>Figure 7.</b> Représentations topographiques de l'activité hémodynamique moyenne des dix participants lors de l'apprentissage (encodage) des mots.....	29

**Figure 8.** Représentations topographiques de l'activité hémodynamique moyenne des dix participants lors de (a) le rappel immédiat (récupération sans délai) et (b) le rappel différé (récupération avec délai) ..... 30

**Figure 9.** Décours temporel de la réponse hémodynamique lors de l'encodage des mots (apprentissage) et de leur récupération successive (rappel immédiat) pour un des participants..... 31

**Figure 10.** Concentrations relatives d'HbO<sub>2</sub> dans les aires temporales antérieures selon le moment du rappel et l'hémisphère cérébral..... 33

**Figure 11.** Concentrations relatives d'HbO<sub>2</sub> au premier rappel selon l'aire cérébrale et l'hémisphère ..... 34

**Figure 12.** Latence des maximums d'intensité optique dans les aires temporales antérieures selon le moment du rappel et l'hémisphère cérébral..... 35



## Remerciements

Je tiens d'abord à témoigner ma reconnaissance envers Dr Renée Béland pour avoir cru en moi et m'avoir si bien guidée dans cette maîtrise. Elle a toujours eu les bons mots pour m'encourager. Son soutien moral, ses conseils judicieux, sa rigueur, son jugement et sa grande générosité m'ont permis d'aller au bout de ce projet. Merci Renée, j'ai vécu une expérience des plus enrichissantes grâce à toi.

Un grand merci à ma co-directrice, Dr Maryse Lassonde, pour son expertise et sa sagesse. En m'intégrant au sein de votre laboratoire, vous m'avez permis d'acquérir une expérience de recherche précieuse.

Je souhaite aussi remercier Dr. Boutheina Jemel qui a gentiment accepté de reprendre la direction de mon mémoire et qui m'a accueilli chaleureusement lors d'un stage dans son laboratoire.

Un merci tout spécial à Marie-Ève Arcand pour son aide précieuse à chaque étape de cette étude et pour l'amitié qui nous lie depuis ce temps.

Je veux remercier toute l'équipe du laboratoire de Sainte-Justine qui a été pour moi une famille : Phetsamone, Julie, Olivia, Emmanuelle, Mélissa, Natacha, Dima, Alexanne, Emanuela. Je suis heureuse que la vie vous ait mis sur ma route. Votre aide morale et technique m'a été précieuse.

J'aimerais souligner le travail exceptionnel et l'expertise de Phetsamone Vannasing, mon mentor en recherche, sans qui le laboratoire ne serait pas ce qu'il est. Merci Phetsamone d'avoir partagé avec moi tes connaissances.

Un grand merci à Julie Tremblay pour son travail acharné. Tu as toujours été là pour répondre à mes questions et tu as rendu l'analyse de mes données moins ardues.

Merci à mes parents, Luc et Sylvie, de m'avoir toujours encouragée et supportée dans mes études. Votre fierté à mon égard me donne envie de me dépasser.

Merci à mon amoureux Nicolas d'être à mes côtés, d'avoir enduré mes sautes d'humeur et d'avoir partagé avec moi les bons comme les moins bons moments de cette aventure.

Merci aux participants qui ont généreusement donné de leur temps pour faire avancer la recherche.

Merci aux Fonds de Recherche en Santé du Québec et au Conseil de Recherches en Sciences Humaines du Canada d'avoir subventionné l'étude qui a mené à la rédaction de ce mémoire.

## Liste des abréviations et sigles

$\alpha$  : seuil de signification

$\eta^2$  : eta-carré

$\omega^2$  : oméga-carré

**AB** : aire de Broadmann

**ANOVA** : analyse de variance

**BEM** : batterie d'efficiences mnésiques

**CHU** : centre hospitalier universitaire

**cm** : centimètre(s)

**dB SPL** : décibels *sound pressure level*

**DPF** : *differential pathlength factor*, facteur de chemin optique différentiel

**$\acute{E}$ -T** : écart-type

**h** : heure(s)

**Hb** : hémoglobine

**HbO<sub>2</sub>** : oxyhémoglobine (hémoglobine oxygénée)

**HbR** : hémoglobine réduite, désoxyhémoglobine (hémoglobine désoxygénée)

**HbT** : hémoglobine totale (somme de HbO<sub>2</sub> et HbR)

**HERA** : *hemispheric encoding/retrieval asymmetry*

**homER** : *hemodynamic Evoked Response*

**Hz** : hertz

**IRM** : Imagerie par résonance magnétique

**IRM *f*** : imagerie par résonance magnétique fonctionnelle

**LI** : *laterality index*, index de latéralité

**M** : moyenne

**MEG** : magnétoencéphalographie

**min** : minute(s)

**mol** : mole(s)

**mW** : milliwatt(s),  $10^{-3}$  watt(s)

**nm** : nanomètre(s)

**s** : seconde(s)

**SPIR** : spectroscopie proche infrarouge

**SPM** : *Statistical Parametric Mapping*

**SPSS** : *Statistical Package for the Social Sciences*

**TEP** : tomographie par émission de positrons

## **Chapitre 1**

### **INTRODUCTION**

## **1.1 Problématique**

### **1.1.1 Traitement chirurgical de l'épilepsie**

L'épilepsie est un symptôme neurologique qui affecte environ 50 millions de personnes à travers le monde (Organisation mondiale de la santé, 2005). Chaque année, près de 15 500 Canadiens reçoivent un diagnostic d'épilepsie. De ce nombre, 75 à 80 % sont âgés de moins de 18 ans (Épilepsie Canada, 2003). La prise de médicaments à long terme constitue de nos jours la principale forme de traitement. Toutefois, chez les patients atteints d'épilepsie réfractaire à la pharmacothérapie (et dont les crises sont limitées à une aire cérébrale restreinte), l'ablation chirurgicale du foyer épileptique est une alternative efficace pour un traitement complet de l'épilepsie (Engel, 1996 ; Wiebe, Blume, Girvin & Eliasziw, 2001). En effet, un contrôle des convulsions à long terme est obtenu chez 66 % des patients avec résection du lobe temporal, 46 % avec résection des lobes occipital et pariétal, et 27 % avec résection du lobe frontal (Télliez-Zenteno, Dhar & Wiebe, 2005).

Malheureusement, on observe de nombreux cas de déficits de langage (Bell, Davies, Hermann & Walters, 2000 ; Hermann, Wyler, Simes & Clement, 1994) et de mémoire (Binder et al., 2008 ; Bonelli et al., 2010 ; Helmstaedter & Elger, 1996 ; Hermann, Seidenberg, Haltiner & Wyler, 1995 ; Lee, Yip & Jones-Gotman, 2002 ; Powell et al., 2008 ; Sabsevitz, Swanson, Morris, Mueller & Seidenberg, 2001 ; Spiers et al., 2001) suite à l'ablation du lobe temporal antérieur. Les déficits mnésiques qui surviennent suite à une telle chirurgie suggèrent une latéralisation des fonctions mnésiques. En effet, les études rapportent fréquemment une diminution des habiletés de mémoire verbale à la suite d'une résection du lobe temporal antérieur gauche et une diminution des habiletés de mémoire non verbale

(visuo-spatiale) suite à une résection du lobe antérieur droit (Binder et al., 2008 ; Bonelli et al., 2010 ; Helmstaedter & Elger, 1996 ; Hermann, Seidenberg, Haltiner & Wyler, 1995 ; Lee, Yip & Jones-Gotman, 2002 ; Powell et al., 2008 ; Sabsevitz, Swanson, Morris, Mueller & Seidenberg, 2001; Spiers et al., 2001). Selon Binder (2011), on observe un déficit de mémoire verbale chez 30 à 60 % des patients suite à une résection du lobe temporal antérieur gauche. Une méta-analyse de Lee, Yip et Jones-Gotman (2002) de 33 études impliquant une chirurgie temporale a comparé la performance des patients dans des tests de mémoire verbale et non verbale effectués en pré et post opératoire. Les résultats suggèrent un déclin de la mémoire verbale et une amélioration de la mémoire non verbale à la suite d'une résection du lobe temporal antérieur gauche. La mémoire verbale serait plus particulièrement touchée lors du rappel libre immédiat. Le lien entre l'ablation du lobe temporal antérieur droit et les difficultés de mémoire non verbales est toutefois moins clair (Lee, Yip & Jones-Gotman, 2002).

Les bénéfices de la chirurgie doivent donc être évalués en tenant compte des risques potentiels suite à la résection de perturber une fonction cérébrale. À cette fin, les patients candidats à une chirurgie se soumettent une évaluation préchirurgicale qui vise à déterminer la latéralisation et la localisation du langage et de la mémoire. La détermination de la latéralisation est d'autant plus importante que la localisation des fonctions langagières et mnésiques varie considérablement d'un patient à l'autre. En effet, la présence d'épilepsie durant l'enfance ou à long terme peut mener à une réorganisation du cerveau et à un changement dans la latéralisation des fonctions langagières (Yuan et al., 2006) et mnésiques (Vannest et al., 2008).

### **1.1.2 Test à l'amobarbital intracarotidien (test de Wada)**

Jusqu'à récemment, l'injection intracarotidienne d'amobarbital, décrite par Wada en 1949, était la technique la plus couramment utilisée lors d'évaluations préopératoires. Cette technique provoque une hémiparésie temporaire durant laquelle les capacités langagières (Wada & Rasmussen, 1960) et mnésiques (Milner, Branch & Rasmussen, 1962) de l'hémisphère non anesthésié sont testées. La procédure est ensuite répétée du côté opposé.

Cette technique comporte toutefois son lot de désavantages. Elle est très invasive et potentiellement traumatisante pour le patient, ce qui la rend d'autant plus difficile d'emploi chez les enfants. De plus, elle ne fournit pas d'information sur la localisation intrahémisphérique des fonctions cognitives, mais seulement sur leur latéralisation. Tenant compte de ces limites, l'utilisation du test à l'amobarbital intracarotidien a été considérablement réduite au cours des 20 dernières années (Baxendale, Thompson & Duncan, 2008) au profit de nouvelles techniques moins effractives.

### **1.1.3 Les techniques d'évaluation non invasives**

Les techniques d'imagerie cérébrale non invasives telles que l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), la magnétoencéphalographie (MEG) et la tomographie par émission de positrons (TEP) sont désormais utilisées dans l'évaluation préchirurgicale (pour une revue, voir Pelletier, Sauerwein, Lepore, Saint-Amour & Lassonde, 2007). Par contre, toutes ces techniques ont l'inconvénient qu'elles exigent l'immobilité totale du sujet, ce qui restreint considérablement le type de tâches langagières pouvant être utilisées. Comme la



personne évaluée ne peut parler, il n'est pas possible de s'assurer que celle-ci effectue correctement la tâche demandée.

#### **1.1.4 L'imagerie optique**

L'imagerie optique, aussi connue sous le nom de spectroscopie proche infrarouge (SPIR), offre une alternative prometteuse. Cette technique d'investigation non invasive mesure les changements hémodynamiques (hausse de l'oxygénation sanguine) qui se produisent lors de l'activité neuronale corticale selon le principe de couplage neurovasculaire (Villringer et Chance, 1997 ; Villringer, Planck, Hock, Schleinkofer & Dirnagl, 1993). Elle utilise des longueurs d'onde du spectre du proche infrarouge (environ 680 à 1000 nm) puisqu'elles sont moins absorbées par les tissus et possèdent donc un plus grand pouvoir de pénétration. Les sources de lumière posées sur le crâne émettent des photons qui pénètrent les tissus. Après avoir été plus ou moins absorbés par l'hémoglobine (Hb), les photons retournent à la surface de la peau où ils sont mesurés par un détecteur. Puisque l'hémoglobine absorbe préférentiellement la lumière de 830 nm lorsqu'elle est oxygénée (oxyhémoglobine, HbO<sub>2</sub>) et de 690 nm lorsqu'elle désoxygénée (déoxyhémoglobine ou hémoglobine réduite, HbR) l'imagerie optique peut mesurer indépendamment des changements de concentration pour chacune de ces chromophores dans les tissus. Une hausse de l'oxygénation tissulaire, c'est-à-dire l'activation d'une aire cérébrale donnée, se traduit typiquement par une augmentation de la concentration de HbO<sub>2</sub> et une diminution de la concentration de HbR. Pour différentes revues, voir Hoshi (2003) et Pellicer et del Carmen Bravo (2011).

Cette technique non invasive et portative (Hintz et al., 2001; Liebert et al., 2005) présente plusieurs avantages par rapport aux autres techniques d'imagerie cérébrale. Elle est sécuritaire et relativement peu coûteuse par rapport à l'IRMf, la MEG et la TEP. Tout en fournissant une bonne résolution temporelle (< 1 seconde) et une bonne résolution spatiale (1-2 cm), elle n'impose pas de restriction importante des mouvements. Le participant peut produire une réponse verbale, ce qui facilite grandement l'évaluation de la performance en langage et en mémoire verbale. De plus, l'utilisation de la SPIR est silencieuse, contrairement à l'IRMf dont les impulsions de radiofréquences produisent de forts bruits qui peuvent interférer avec le traitement de stimuli auditifs. Ces avantages font de l'imagerie optique une technique tout à fait appropriée pour l'évaluation de populations particulières telles que les jeunes enfants (ex. Baird et al., 2002 ; Bortfeld, Fava & Boas, 2009) et les personnes atteintes de troubles cognitifs (ex. Serap, Tapsin & Akin, 2009) ou psychiatriques (ex. Suto, Fukuda, Ito, Uehara & Mikuni, 2004).

Watanabe et al. (1998) rapportent des indices de latéralisation du langage en imagerie optique qui corrélerent pour tous les sujets épileptiques avec les résultats du test à l'amobarbital intracarotidien. Des études réalisées dans nos laboratoires ont confirmé ces résultats et mis en évidence l'utilité de la SPIR fonctionnelle dans la localisation et la latéralisation du langage expressif et réceptif chez des enfants épileptiques (Gallagher et al., 2007; Gallagher et al., 2008a ; Gallagher et al., 2008c).

L'évaluation préchirurgicale de la mémoire est toutefois plus complexe que celle du langage. Les processus qui sous-tendent la mémoire, et donc les aires cérébrales impliquées, varient selon le processus mnésique (encodage, récupération), le type de mémoire (de travail, sensorielle, à long terme) et la nature des stimuli (verbal, visuo-spatial). Jusqu'à maintenant,

peu d'études ont investigué les fonctions mnésiques à l'aide de l'imagerie optique. La majorité d'entre elles, réalisées principalement par des équipes de recherche japonaises, portent sur la mémoire de travail et se limitent au cortex préfrontal (Aoki, Sato, Katura, Matsuda & Koizumi, 2013 ; Koike et al., 2013 ; Sato et al., 2013 ; Sato, Aoki, Katura, Matsuda & Koizumi, 2011 ; Tanida & Sakatani, 2013 ; Tsujimoto, Yamamoto, Kawaguchi, Koizumi & Sawaguch, 2004). Matsui, Tanaka, Yonezawa et Kurachi (2007) sont les seuls à notre connaissance à avoir utilisé la spectroscopie proche infrarouge pour examiner la réponse hémodynamique lors d'une tâche d'apprentissage verbal. Comme c'est le cas dans plusieurs autres études, l'enregistrement hémodynamique ne couvrait que le cortex préfrontal. Les résultats de Matsui et al. (2007) suggèrent une activation (augmentation de HbO<sub>2</sub> et diminution de HbR) du cortex préfrontal durant toute la tâche, et de manière plus importante lors du rappel que lors de l'encodage. À notre connaissance, aucune étude n'a à ce jour étudié les processus mnésiques à des fins d'évaluation préchirurgicale à l'aide de l'imagerie optique.

## **1.2 Objectifs et hypothèses**

L'objectif principal de cette étude est de développer un protocole permettant d'investiguer la mémoire verbale, lequel pourrait éventuellement être utilisé chez des patients épileptiques (incluant des enfants) candidats à la chirurgie. Plus précisément, la spectroscopie dans le proche infrarouge a été utilisée auprès d'adultes sains pour localiser les processus mnésiques associés à l'encodage et au rappel de mots. Il est difficile de distinguer l'activité cérébrale reliée à la mémoire de celle reliée à d'autres processus impliqués dans la tâche (ex. audition, langage). C'est pourquoi la présente étude ne vise pas à déterminer les régions

cérébrales qui sous-tendent les processus mnésiques, mais plutôt à localiser les aires impliquées dans la tâche afin d'en évaluer le potentiel clinique.

Les connaissances actuelles provenant d'études anatomiques, neuropsychologiques et physiologiques soulignent l'importance du lobe temporal médian et d'un large réseau distribué d'aires corticales dans la mémoire déclarative épisodique (pour une revue, voir Dickerson & Eichenbaum, 2010). Les déficits mnésiques fréquemment rapportés par les patients atteints d'épilepsie temporale suggèrent une spécialisation hémisphérique des processus mnésiques selon le type de stimuli. Ainsi, l'épilepsie temporale gauche affecterait principalement la faible mémoire verbale, alors que l'épilepsie temporale droite affecterait davantage la mémoire non verbale. (Baxendale et al., 1998; Gleißner, Helmstaedter & Elger, 1998, Hermann, Seidenberg, Schoenfeld & Davies, 1997; Kim H., Yi, Son & Kim J., 2003). Les évaluations neuropsychologiques réalisées chez les patients atteints d'épilepsie du lobe frontal révèlent aussi communément des troubles de mémoire (Centeno, Thompson, Koepp, Helmstaedter & Duncan, 2010). Le cortex préfrontal, impliqué dans les fonctions exécutives (Kane & Engle, 2002 ; Miller & Cohen, 2001), serait aussi impliqué bilatéralement dans la mémoire déclarative épisodique (Dickerson & Eichenbaum, 2010). Une revue de Centeno et al. (2010) souligne la présence de déficits cognitif chez les patients atteints d'épilepsie du lobe frontal. Selon le modèle HERA (*hemispheric encoding/retrieval asymmetry*), le cortex préfrontal gauche serait davantage impliqué dans l'encodage, alors que le cortex préfrontal droit serait davantage impliqué dans la récupération (Habib, Nyberg & Tulving, 2003).

À la lumière de ces connaissances, nous formulons les hypothèses suivantes quant à la nature et la localisation des activations qui devraient être enregistrées dans les tâches de mémoire verbale à l'aide de l'imagerie optique :

- Une activation bilatérale des régions préfrontales et temporales dans toutes les tâches de mémoire verbale (H1).
- Une activité hémodynamique plus ample en temporal gauche qu'en temporal droit durant toutes les étapes de la tâche de mémoire verbale (H2).
- Une activité hémodynamique plus ample en préfrontal gauche qu'en préfrontal droit durant la phase d'encodage des mots en mémoire verbale (H3).
- Une activité hémodynamique plus ample en préfrontal droit qu'en préfrontal gauche durant la phase de récupération des mots en mémoire verbale (H4).
- Une activité hémodynamique plus ample lors de la phase récupération de mots que lors de la phase d'encodage pour la tâche de mémoire verbale (H5).

## **Chapitre 2**

# **MÉTHODOLOGIE**

## 2.1 Participants

La présente étude a été effectuée auprès de dix adultes sains (5 femmes/5 hommes) âgés de 22 à 28 ans ( $M = 24.5$ ,  $\acute{E}-T = 1.99$ ) dont la langue maternelle et la langue d'usage était le français. Les participants ont complété de 12 à 20 années de scolarité ( $M = 17.8$ ,  $\acute{E}-T = 2.15$ ). Tous les sujets ayant participé à l'étude étaient droitiers selon une traduction de l'*Edinburgh Handedness Inventory* (Oldfield, 1971 ; Annexe A). Les participants avaient tous une bonne audition et une vision normale ou corrigée. Un questionnaire auto-rapporté sur l'histoire médicale indiquait l'absence de problèmes de santé importants, de troubles langagiers, cognitifs ou neurologiques et d'épisodes de convulsion. Aucun d'eux n'était sous médication.

Recrutés dans l'entourage des membres de l'équipe de recherche, les participants ont donné leur consentement libre et éclairé par écrit. Tous ont reçu une compensation financière de 55 dollars pour leur temps et leur déplacement. Le projet a reçu l'approbation du comité d'éthique du Centre hospitalier universitaire (CHU) Sainte-Justine.

## 2.2 Stimuli

### 2.2.1 Stimuli verbaux

Les stimuli verbaux étaient constitués de 36 mots sélectionnés à partir d'une tâche auditive développée dans le cadre d'une étude de Gallagher et al. (2008b). Les mots ont été enregistrés par une voix masculine à l'aide du logiciel *Cool Edit Pro*, puis édités dans *Praat* (Boersma & Weenink, 2009) pour en définir visuellement les contours. Tous les mots retenus étaient des noms communs concrets généralement connus à l'âge de 6 ans selon la base de

données lexicales *Manulex* (Lété, Sprenger-Charolles & Colé, 2004 ; Ortéga & Lété, 2010). Ainsi, la tâche développée dans le cadre de la présente étude pourra être utilisée auprès d'enfants de 6 ans et plus lors d'études ultérieures.

Trois listes de douze mots ont été créées afin qu'elles soient équivalentes en termes de complexité de la structure syllabique, du nombre de phonèmes, du nombre de syllabes à l'oral et de fréquence lexicale. Cette dernière a été déterminée à partir du corpus de films de la base de données *Lexique 3.71* (New, Pallier, Ferrand & Matos, 2001). La fréquence des mots variait de 2.78 à 156.68 occurrences par million. Une analyse de variance (ANOVA) sur les valeurs de fréquence lexicale n'a révélé aucune différence significative entre les listes ( $F = 0.17, p = .98$ ). La durée des stimuli varie de 0.35 à 0.91 seconde ( $M = 0.65$  s).

Chaque liste comportait un nombre équivalent de mots d'une même catégorie sémantique (ex. animaux, partie du corps, transport) de façon à ce que les listes soient équivalentes pour les participants en terme de stratégie de rappel. Selon l'ordre pseudoaléatoire, deux mots de la même catégorie sémantique n'étaient jamais présentés l'un à la suite de l'autre afin d'éviter l'activation de liens sémantiques. Ainsi, les mots *aigle* et *dinde* (liste 1) qui appartiennent à la même catégorie sémantique n'étaient pas présentés successivement. Les trois listes de mots sont reproduites au *tableau I*.



Tableau I.

*Listes de mots employés lors de la tâche verbale*

Liste 1	Liste 2	Liste 3
autobus	poussin	dragon
poupée	dentiste	pince
fourmi	jupe	genou
bureau	robinet	perroquet
aigle	abeille	étoile
comptoir	canon	cage
dinde	auto	avion
enveloppe	feuille	carré
robot	table	grenouille
fusée	renard	cadre
épaule	bouteille	château
rose	talon	oignon

### **2.2.2 Stimuli non verbaux**

Les stimuli non verbaux étaient quant à eux constitués d'images en noir et blanc provenant de la Batterie d'efficacité mnésique (BEM-144, Signoret, 1991). Les images ont été numérisées à partir du test original, puis traitées dans le logiciel *PhotoFiltre Studio* pour en améliorer la netteté et créer des planches de choix de réponse. Toutes les images étaient sans signification afin d'éviter que les participants ne verbalisent ce qu'ils voient et activent les aires cérébrales du langage. Les images étaient regroupées en trois séries de douze images (cibles) associées chacune à un choix de réponse de quatre images (voir *Figure 1* pour un exemple). L'ordre de présentation pseudoaléatoire a permis de s'assurer que les participants ne puissent pas anticiper les bonnes réponses.

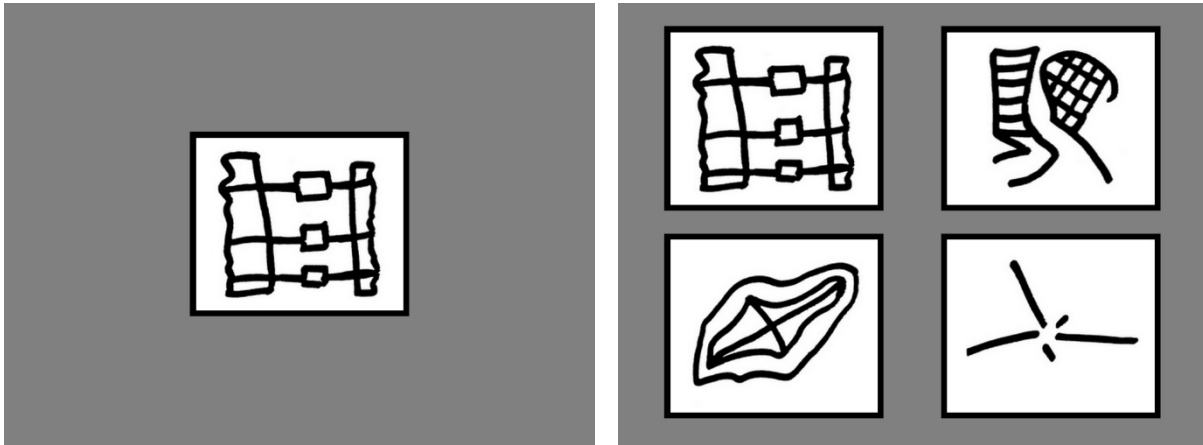


Figure 1. Exemple d'une image présentée lors de la tâche non verbale et les choix de réponses y étant associés.

### 2.3 Tâches et procédure

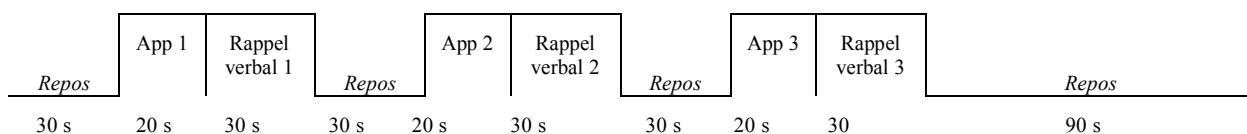
À leur arrivée au laboratoire d'imagerie optique du CHU Sainte-Justine, les participants ont lu et signé le formulaire de consentement préalablement approuvé par le comité d'éthique du Centre de recherche. Après avoir répondu au test de dominance manuelle (*Edinburgh Handedness Inventory*, Oldfield, 1971 ; Annexe A) et au questionnaire maison sur l'histoire médicale (Annexe B), les participants ont procédé à l'essayage des casques pour déterminer celui étant le mieux adapté à la taille de leur tête. Ce casque rigide a été spécialement élaboré pour les séances d'imagerie optique. Il permet une tenue adéquate des sources de lumière et des détecteurs sur le cuir chevelu du participant durant toute la durée de l'enregistrement.

Le participant a ensuite été invité à prendre place sur un fauteuil dans une pièce anéchoïque électromagnétique (cage de Faraday) où a eu lieu l'installation des sources et

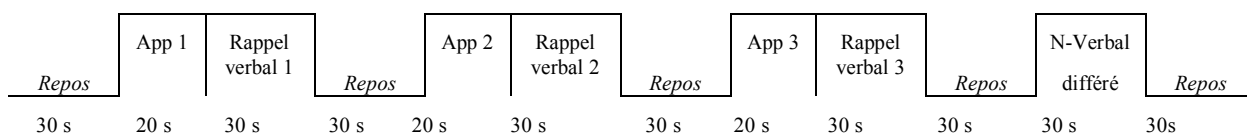
détecteurs. L'expérimentatrice donnait alors les instructions et informations générales applicables aux séances d'imagerie optique (ex. éviter les mouvements importants ou brusques de la tête pour réduire la présence d'artéfacts dans les enregistrements).

Le plan d'expérimentation a été construit selon une conception par blocs. La *figure 2* illustre le déroulement de chacun de ces blocs. Tous débutaient et se terminaient par une période de repos de 30 secondes permettant de mesurer le niveau de base de l'activité hémodynamique au repos, c'est-à-dire lors que le participant n'est pas engagé dans une tâche de mémoire. On demandait alors au participant de garder le silence et de se concentrer sur la croix noire qui apparaissait à l'écran.

### Bloc 1 : Tâche de mémoire verbale



### Blocs 3 et 5 : Tâche de mémoire verbale



### Blocs 2, 4 et 6 : Tâche de mémoire non verbale

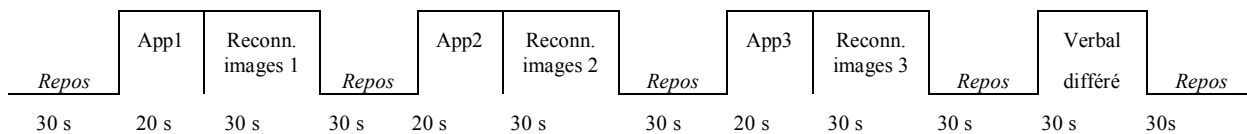


Figure 2. Déroulement des blocs. *App* = *Apprentissage* ; *Reconn.* = *Reconnaissance*.

Les blocs de la tâche de mémoire verbale étaient entrecoupés de blocs d'une tâche de mémoire non verbale. Celle-ci était construite selon le même patron que les tâches verbales. Elle se déroulait de la manière suivante : Après 30 secondes de mesure du niveau de base, on présentait au participant l'une des séries de 12 images (1.4 s/image) sur un moniteur à 120 cm devant lui. Le participant disposait ensuite de 2.5 secondes pour déterminer, parmi un choix de quatre images, laquelle faisait partie de la série présentée. Cette phase de reconnaissance d'images était d'une durée totale de 30 secondes. On retrouvait 12 planches d'un choix de quatre images, une pour chaque image préalablement présentée et avec une seule bonne réponse par planche. Les trois images distractives de chaque planche n'avaient jamais été présentées au participant. Pour indiquer sa réponse, le participant appuyait sur l'une des quatre touches d'un petit clavier posé devant lui. La disposition des touches correspondait à celle des images (choix) sur l'écran. En utilisant deux doigts, un de chaque main, pour appuyer sur les touches, on évitait que la réponse cérébrale motrice soit responsable d'une latéralisation de l'activité hémodynamique. Tout comme dans la tâche de mémoire verbale, une même série d'images était présentée à trois reprises à l'intérieur d'un même bloc. Les planches de choix de réponse n'étaient toutefois pas présentées plus d'une fois dans un même ordre afin d'empêcher l'anticipation de la réponse à venir.

À la fin de chaque bloc d'une tâche (à l'exception du premier), le participant effectuait, selon le cas, un rappel différé des mots ou une reconnaissance différée des images du bloc précédent. Ainsi, une tâche de mémoire non verbale a permis de s'assurer que le matériel verbal n'était pas conservé en mémoire de travail et d'établir un délai (environ 7 minutes) entre le rappel immédiat et le rappel différé d'une liste de mots. La *figure 3* illustre le déroulement des blocs. Trois blocs de la tâche de mémoire verbale en alternance avec trois

blocs de la tâche de mémoire non verbale ont été présentés. Ainsi, les blocs 1, 3 et 5 étaient consacrés à la tâche verbale et les blocs 2, 4 et 6 à la tâche non verbale. Entre chaque bloc, l'expérimentatrice se rendait auprès du participant pour s'assurer de son confort et expliquer la tâche à venir. La présentation des stimuli (verbaux et non verbaux) a été générée par le logiciel *E-Prime* (Psychology Software Tools Inc.).

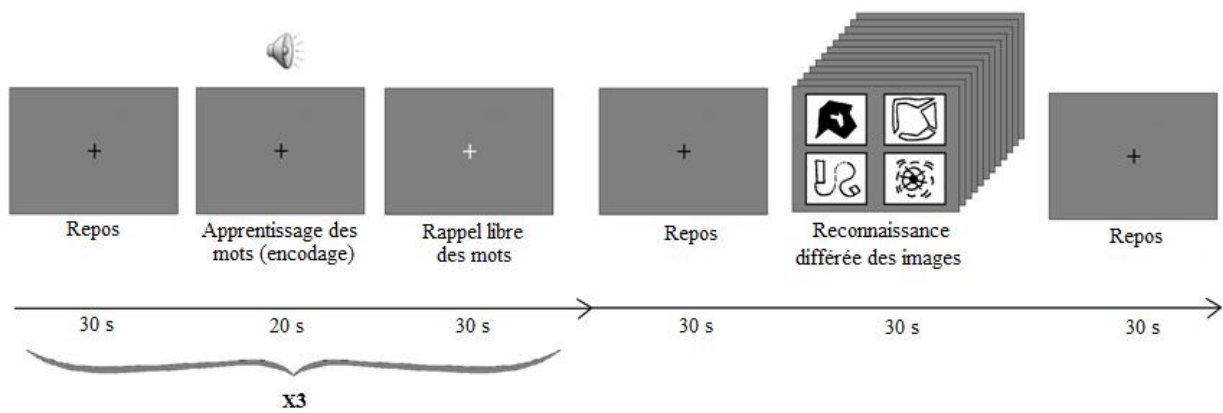


Figure 3A. Déroulement d'un bloc de la tâche de mémoire verbale, incluant une reconnaissance différée des images présentées au bloc précédent.

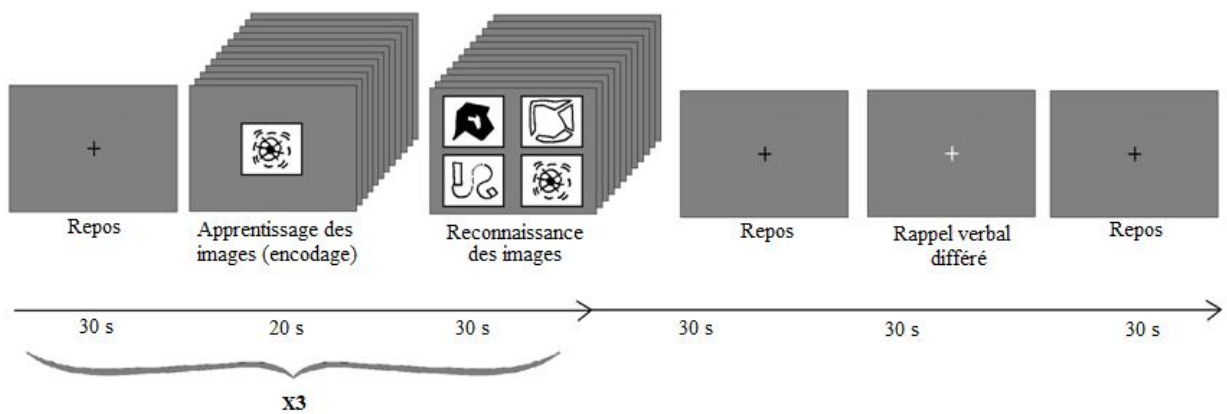
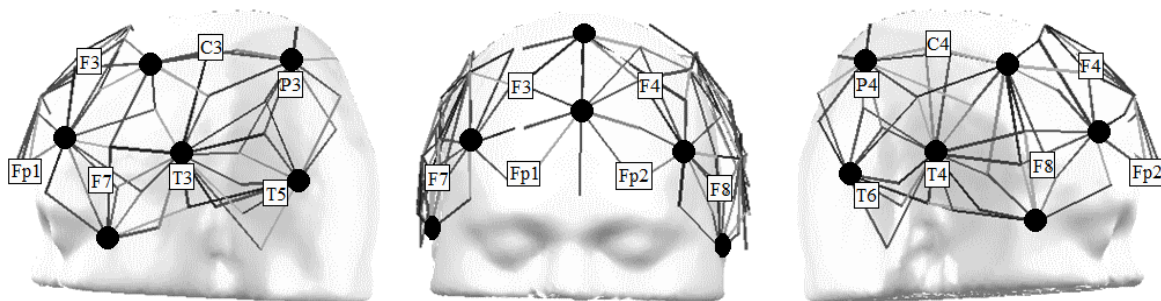


Figure 3B. Déroulement d'un bloc de la tâche de mémoire non verbale, incluant un rappel différé des mots présentés au bloc précédent.

Chaque bloc était d'une durée de 4 minutes et 30 secondes. La durée totale de l'expérimentation était d'environ 2 heures, incluant l'installation des sources et détecteurs sur la tête du participant ( $\approx 1$  h), l'enregistrement des données hémodynamiques ponctué de courtes pauses entre les blocs ( $\approx 45$  min) et la numérisation de la position des sources et détecteurs sur la tête du sujet ( $\approx 15$  min).

## 2.4 Acquisition des données

Les données hémodynamiques ont été obtenues à l'aide d'un spectromètre à canaux multiples *Imagent Tissue Oxymeter* (ISS inc., Champaign, Ill, USA) qui comporte 16 détecteurs et 64 sources émettant à la fois des photons de 690 nm et des photons de 830 nm ( $\approx 1$  mW). La position de chaque source et de chaque détecteur a été déterminée de manière à couvrir les lobes frontaux, temporaux et pariétaux, reconnus pour être impliqués bilatéralement dans les processus de mémoire (*figure 4*). Quatorze détecteurs et cinquante-cinq sources ont été utilisés dans le cadre de cette étude. L'acquisition des données a été effectuée à l'aide du logiciel *BOXY* (ISS).



*Figure 4* Couverture de l'enregistrement en imagerie optique et position des détecteurs (cercles noirs) selon les différentes régions du système 10-20.

## 2.5 Traitement des données

Les données d'intensité optique ont été normalisées en divisant par la moyenne des valeurs de chaque point d'échantillonnage, puis filtrées avec une bande passante de 0,001 à 0,1 Hz afin de retirer les oscillations associées à la respiration ( $\approx 0.125$  à  $0.33$  Hz), aux pulsations cardiaques ( $\approx 1$  Hz) et à une partie des ondes de Mayer ( $\approx 0.1$  Hz) (Gratton & Corballis 1995). Afin d'éliminer les artéfacts de mouvement, les canaux dont la variation en intensité normalisée était supérieure à 10 % ont été rejetés. Les données ont ensuite été transformées, selon la Loi de Beer-Lambert modifiée, en concentrations relatives de HbO<sub>2</sub>, de HbR et d'hémoglobine totale (HbT, somme de HbO<sub>2</sub> et HbR) de chaque canal. À cette étape, un coefficient de chemin optique différentiel (Differential pathlength factor, DPF) a été appliqué pour estimer la distance parcourue par les photons en tenant compte des propriétés des tissus selon l'âge des participants. La moyenne des concentrations relatives de chaque bloc fut ensuite calculée pour chaque participant. Ces étapes de traitement préalables aux analyses statistiques ont été effectuées à l'aide d'une *toolbox* pour SPM développée à ces fins (Tremblay, 2012). Le logiciel *homER* (Hemodynamic Evoked Response, Huppert et al., 2009) a ensuite permis, par projection orthogonale sur le modèle d'IRM standardisé Colin27 (Evans, Collins & Milner, 1992), d'identifier les sites cérébraux associés à la mémoire verbale lors de l'encodage et de la récupération. Les maximums d'intensité optique (positif ou négatif) ont été sélectionnés pour chaque région significativement activée lors de l'apprentissage des mots (20 secondes) et de leur rappel (30 secondes + 10 secondes pour permettre à l'activité parfois forte d'atteindre son maximum). Les données issues de la tâche de mémoire non verbale feront l'objet d'une étude ultérieure.

## 2.6 Analyses statistiques

Des analyses de variance (ANOVA) à mesures répétées ont été effectuées à l'aide du logiciel *SPSS 17.0* pour *Windows* pour évaluer l'effet du moment de l'apprentissage (1<sup>er</sup>, 2<sup>e</sup>, 3<sup>e</sup>), du moment du rappel (1<sup>er</sup>, 2<sup>e</sup>, 3<sup>e</sup>, différé) et de la latéralité (hémisphère gauche, hémisphère droit) sur l'amplitude et la latence des maximums d'intensité optique. Des tests F dont les degrés de liberté sont corrigés par le facteur de Greenhouse et Geisser ont été utilisés dans le cadre de la présente étude. En ce qui concerne les indices de taille d'effet des analyses de variance, c'est l'oméga-carré ( $\omega^2$ ) qui a été choisi puisqu'il tient compte de l'instabilité des résultats lorsque les groupes sont de petites tailles. Toutes les analyses ont été faites avec un intervalle de confiance de 0.95 ( $\alpha=.05$ ).



**Chapitre 3**  
**RÉSULTATS**

### 3.1 Données comportementales

#### 3.1.1 Performances

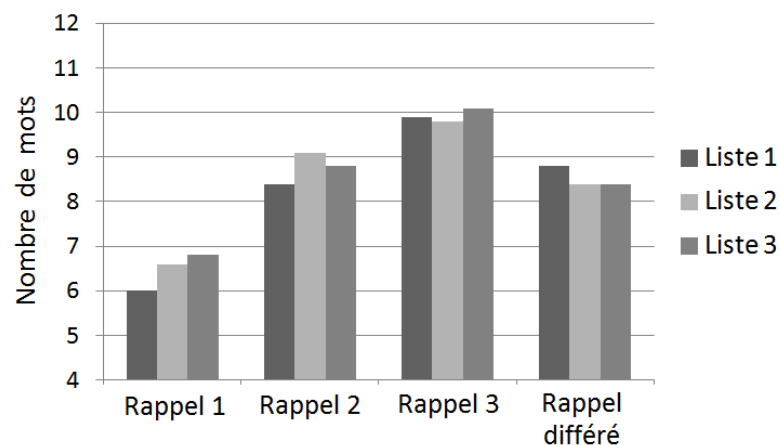
Le nombre de bonnes réponses de chaque sujet pour chacune des listes de mots est rapporté au *tableau II*. Sont considérés comme de bonnes réponses les mots correctement rappelés en excluant les répétitions et les mots qui proviennent d'autres listes que celle évaluée. Tous les mots des listes ont été rappelés à au moins une reprise par l'un ou l'autre des participants, indiquant qu'une liste n'était pas désavantagée par rapport aux autres du fait qu'elle contenait un mot plus difficile qu'aucun participant n'aurait rappelé.

Tableau II.

*Nombre de bonnes réponses (sur un maximum de 12) pour chaque participant selon la liste rappelée et le type de rappel effectué.*

	Liste 1				Liste 2				Liste 3			
	Rappels Immédiats			Rappel Différé	Rappels Immédiats			Rappel différé	Rappels Immédiats			Rappel Différé
	1	2	3		1	2	3		1	2	3	
<b>Sujet 1</b>	7	9	10	9	7	11	9	10	7	9	10	9
<b>Sujet 2</b>	7	9	11	10	6	11	11	9	7	12	12	12
<b>Sujet 3</b>	7	8	11	10	5	10	10	9	8	8	10	8
<b>Sujet 4</b>	8	12	11	9	10	11	12	10	8	8	10	8
<b>Sujet 5</b>	5	8	8	4	7	9	8	6	7	8	8	5
<b>Sujet 6</b>	5	8	11	10	7	9	12	11	5	8	11	9
<b>Sujet 7</b>	5	7	8	7	6	7	8	3	7	6	8	5
<b>Sujet 8</b>	5	8	9	9	6	5	8	7	5	8	11	8
<b>Sujet 9</b>	7	8	10	9	8	9	11	10	8	10	10	11
<b>Sujet 10</b>	4	7	10	11	4	9	9	9	6	11	11	9
<b>Moyenne (Écart-Type)</b>	6.0 (1.3)	8.4 (1.4)	9.9 (1.2)	8.8 (2.0)	6.6 (1.7)	9.1 (1.9)	9.8 (1.6)	8.4 (2.4)	6.8 (1.4)	8.8 (1.7)	10.1 (1.3)	8.4 (2.2)

Une analyse de variance (ANOVA) à mesures répétées sur deux facteurs a permis de comparer simultanément les effets de la position du rappel dans le temps (rappel 1, rappel 2, rappel 3, rappel différé) et de la liste apprise (1, 2, 3) sur le nombre de bonnes réponses des participants. Les résultats révèlent un effet principal du moment du rappel ( $F(1.6,13.9) = 22.48, p < .05$ ) sur la performance des participants. Des comparaisons par paires, avec corrections de Bonferroni du seuil de signification statistique, ont permis de mettre en lumière les différences entre les rappels ( $p < .05$ ). Le nombre moyen de bonnes réponses est plus faible au premier rappel ( $M = 6.5$ ) qu'au deuxième ( $M = 8.8$ ) et plus faible au deuxième rappel qu'au troisième ( $M = 9.9$ ). Le nombre moyen de mots produits en rappel différé ( $M = 8.5$ ) est quant à lui inférieur à celui du troisième rappel et non significativement différent à celui du deuxième rappel (*figure 5*). La taille d'effet ( $\omega^2$ ) est de .42, ce qui est considéré comme très élevé selon Keppel (1991). Les scores moyens des participants ne diffèrent pas en fonction de la liste de mots qui a été utilisée, puisque l'effet lié à la liste utilisée n'est pas significatif ( $F(1.6,14.4) = 0.32, p = .69$ ) et ce, quel que soit le moment du rappel, tel que démontré par l'absence d'interaction significative entre le type de liste et le moment du rappel ( $F(3.9,35.3) = 1.12, p = .36$ ).



*Figure 5.* Nombre de mots correctement rappelés pour chaque liste selon le moment du rappel.

Lors des rappels différés, le participant #5 a rappelé en moyenne 5 mots (en excluant les répétitions), alors que le nombre moyen de bonnes réponses produites par les autres participants est de 8.9. La seule différence connue entre ce participant et les autres et qui pourrait avoir un impact sur le nombre de mots rappelés est le nombre d'années de scolarité. Ce participant a complété 12 années d'étude alors que la moyenne est de 17.8 ( $\bar{E}-T = 2.2$ ) années. Une analyse unilatérale révèle effectivement une forte corrélation ( $r$  de Pearson = .62,  $p < .05$ ) entre le nombre de mots correctement rapportés en rappel différé et le nombre d'années de scolarité. Cette corrélation n'est toutefois pas présente lors des rappels immédiats, c'est-à-dire ceux effectués tout de suite après l'apprentissage des listes de mots ( $p = .12$ ).

### 3.1.2 Types d'erreurs

Le *tableau III* rapporte les types d'erreurs commises par chaque participant, soit l'intrusion et la persévération inter-essai. L'intrusion réfère à un mot ne faisant pas partie de la liste à rappeler. La majorité des intrusions (56 %) sont des mots issus d'une liste précédemment apprise. Les paraphasies verbales sémantiques (ex. *auto* → *voiture*) et phonémique (ex. *cage* → *page*) sont responsables respectivement de 25 % et 17 % des intrusions. Lorsqu'une même intrusion se répète au cours des essais, on qualifie cette intrusion de persévération *inter-essai*. Les persévérations *intra-essai*, c'est-à-dire au sein d'une même période de rappel, n'ont quant à elles pas été considérées comme des erreurs puisque les participants ont reçu la consigne de rappeler des mots durant toute la période de rappel libre (30 s) sans se préoccuper des répétitions.

Tableau III.

*Types d'erreurs commises par chaque participant selon le délai du rappel.*

		Participants									
		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
Intrusion	<i>Rappel Immédiat</i>		1	1	1	1					
	<i>Rappel Différé</i>	2	2	1	1			1	2		3
Persévération inter-essai	<i>Rappel Immédiat</i>					1					
	<i>Rappel Différé</i>			1		1					

### 3.1.3 Effet de primauté et de récence

Afin de déterminer si les participants avaient tendance à rappeler préférentiellement les premiers mots (effet de primauté) ou les derniers mots des listes (effet de récence), les pourcentages de mots rappelés provenant de la première moitié de la liste, ainsi que de la seconde moitié de la liste ont été calculés. Les mots rappelés à plus d'une reprise n'ont été comptés qu'une seule fois.

Deux tests-t pour échantillons appariés ont été effectués selon le moment du rappel. En rappel différé, les résultats révèlent un effet de primauté ( $t(9) = 2.84, p < .05$ ). Ainsi, le pourcentage de mots rappelés qui proviennent de la première moitié de la liste de mots ( $M = 53 \%$ ,  $\acute{E}-T = 3 \%$ ) est significativement plus élevé que le pourcentage de mots de la seconde moitié ( $M = 47 \%$ ,  $\acute{E}-T = 3 \%$ ), et ce, avec une taille d'effet élevée ( $\eta^2 = .47$ ) selon les recommandations de Cohen (1988). En ce qui concerne les rappels immédiats, il n'existe pas de différence significative ( $t(9) = 0.47, p = .65$ ) entre les mots de la première partie ( $M = 51 \%$ ,  $\acute{E}-T = 5 \%$ ) et ceux de la seconde ( $M = 49 \%$ ,  $\acute{E}-T = 5 \%$ ).

## 3.2 Données hémodynamiques

### 3.2.1 Corrélation

On observe une corrélation négative ( $r$  de Pearson =  $-0.22$ ,  $p < .05$ ) entre les concentrations de HbO<sub>2</sub> en temporal antérieur gauche et les performances (nombre de bonnes réponses). Ainsi, un score plus faible est associé à une activité hémodynamique plus élevée dans l'aire temporale antérieure gauche.

### 3.2.2 Index de latéralité

L'index de latéralité (LI) a été calculé pour chaque participant lors de l'encodage, du rappel immédiat et du rappel différé selon la formule suivante :

$$LI = \frac{(L - R)}{(L + R)}$$

où  $L$  correspond à la variation maximale de concentration relative de HbO<sub>2</sub> dans la région temporale gauche et  $R$  à la variation maximale de concentration relative de HbO<sub>2</sub> dans les aires homologues droites. Une valeur entre  $-1$  et  $0,26$  est considérée comme une dominance de l'hémisphère droit, entre  $0,26$  et  $1$  comme une dominance de l'hémisphère gauche et entre  $-0,25$  et  $0,25$  comme une représentation bihémisphérique (Baciu, Watson, Maccotta, McDermott, Buckner & Gilliam, 2005 ; Seghier, 2008).

Les valeurs des index de latéralité obtenues (*figure 6*) révèlent une activité bilatérale chez la plupart des participants. La phase d'encodage des mots semble la plus propice à évoquer une réponse latéralisée (chez 5 participants sur 10) par rapport aux rappels immédiat et différé (3 participants sur 10).

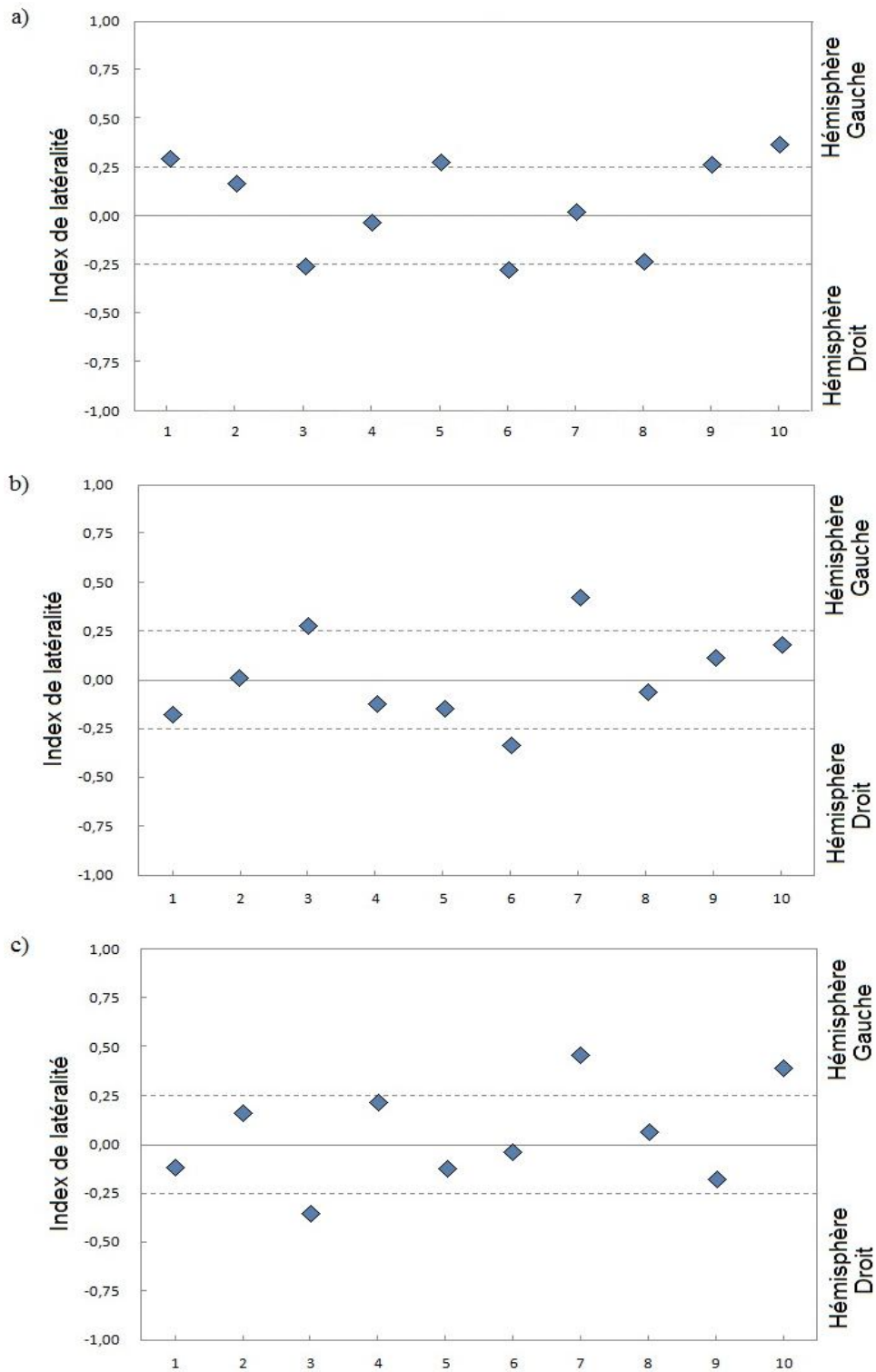


Figure 6. Index de latéralité pour chaque participant (1 à 10) lors de a) l'encodage, b) du rappel immédiat et c) du rappel différé.

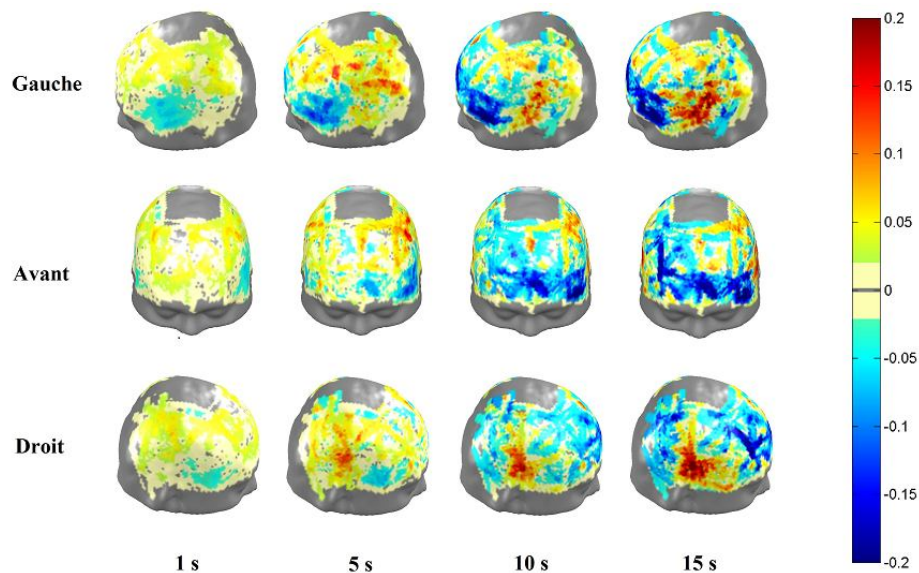
### 3.2.3 Analyses de groupe

Étant donné la grande variabilité interindividuelle de l'activité hémodynamique, nous avons identifié, à partir des représentations topographiques de tous les participants moyennés, les régions montrant les concentrations de HbO<sub>2</sub> supérieures à 75% de la valeur maximale. Cette analyse révèle que les concentrations les plus élevées se retrouvent principalement dans les aires temporales antérieures, temporales moyennes et dans une partie des aires préfrontales.

Dans chacune de ces régions, nous avons identifié les concentrations maximales de HbO<sub>2</sub> pour chaque participant en fonction du processus mnésique requis. Les concentrations de HbO<sub>2</sub> ont été utilisées comme variable dépendante puisqu'une augmentation de ce chromophore est typiquement associée à une hausse de l'oxygénation tissulaire caractéristique de l'activité neuronale. Les *figures 7 et 8* représentent topographiquement l'activité hémodynamique moyenne en fonction des différents processus mnésiques. En projetant les régions activées sur un modèle d'atlas des aires corticales de Brodmann, nous observons une activation bilatérale des gyri temporaux inférieur, moyen et supérieur (AB 20, 21 & 22) et du cortex auditif primaire (AB 41 & 42) durant la phase d'encodage. Lors des rappels verbaux immédiats, à ces régions s'ajoutent bilatéralement : le cortex somatosensoriel primaire (AB 1,2 & 3), le cortex moteur primaire (AB 4), le cortex périrhinal (AB 35), le gyrus fusiforme (AB 37), les pôles temporaux (AB 38), les gyri angulaire et supramarginal (AB 39, 40), le gyrus frontal inférieur (AB 44 & 45), le cortex préfrontal dorsolatéral (AB 46) et l'aire rétrosubiculaire (AB 48). Enfin, lors du rappel verbal différé, ces mêmes régions sont activées, avec en plus le cortex préfrontal antérieur (AB 10).



La *figure 9* présente les courbes d'activation hémodynamique lors de l'encodage et de la récupération des mots dans les aires préfrontales, temporales antérieures et temporales moyennes. L'amplitude de l'activité cérébrale dans la région préfrontale est significativement ( $F(1.35,12.10) = 5.59, p < .05$ ) plus ample au moment des rappels différés ( $M = 1.32 \mu\text{mol}$ ) et immédiats ( $M = 0.99 \mu\text{mol}$ ) que lors de l'encodage ( $M = 0.11 \mu\text{mol}$ ). La différence n'est pas significative entre les deux types de rappel (différé et immédiat). L'activité dans ces aires ( $F(1,9) = 0.31, p = .59$ ) ne montre pas de latéralisation, et ce, quel que soit le processus mnésique ( $F(1.30,11.73) = 0.34, p = .63$ ). Afin de déterminer si le processus mnésique (encodage, récupération immédiate, récupération différée) et l'hémisphère cérébral (gauche, droit) ont un impact sur les concentrations relatives de  $\text{HbO}_2$ , une ANOVA à mesures répétées (*processus mnésique* X *hémisphère*) a été effectuée pour les aires temporales antérieures et moyennes.



*Figure 7.* Représentations topographiques de l'activité hémodynamique moyenne des 10 participants lors de l'apprentissage (encodage) des mots sur une échelle de -0.2 à 0.2  $\mu\text{mol}$ .

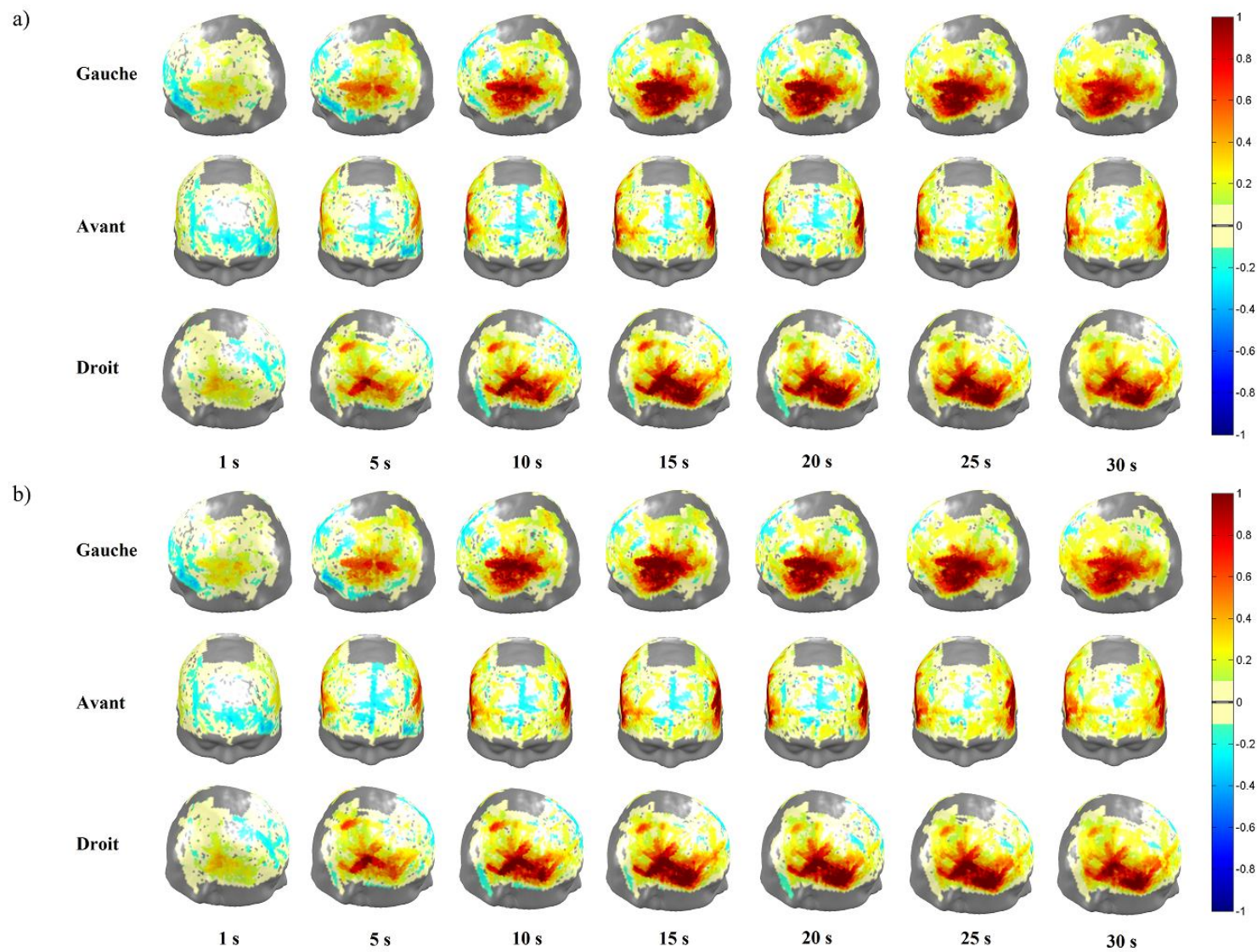


Figure 8. Représentations topographiques de l'activité hémodynamique moyenne des 10 participants lors de (a) le rappel immédiat (récupération sans délai) et (b) le rappel différé (récupération avec délai) sur une échelle de -1 à 1  $\mu\text{mol}$ .

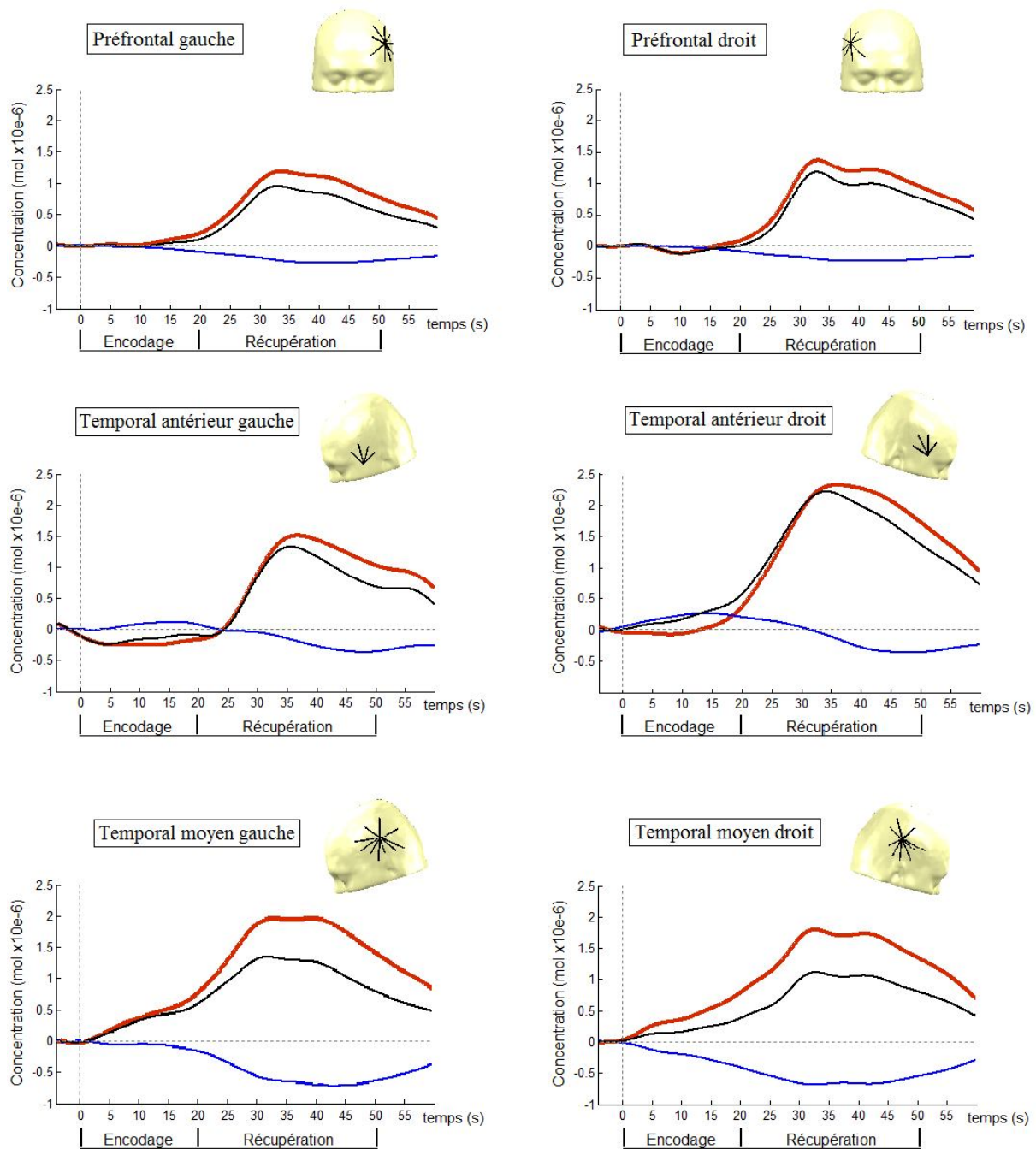
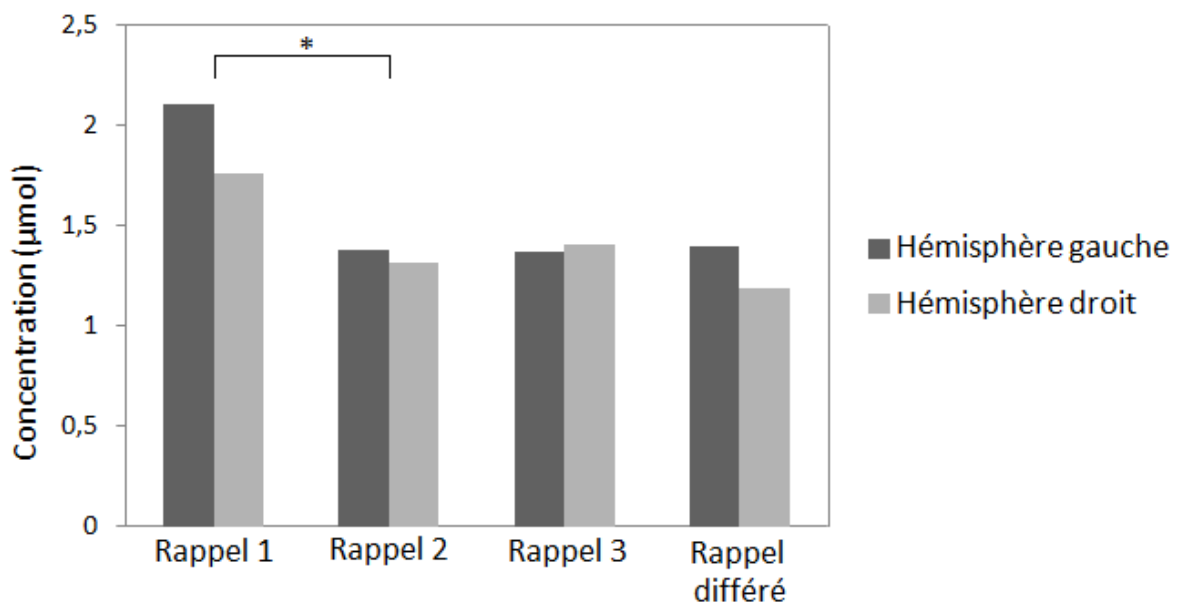


Figure 9. Décours temporel de la réponse hémodynamique lors de l'encodage des mots (apprentissage) et de leur récupération successive (rappel immédiat) pour un des participants.

En temporal antérieur, l'amplitude des courbes hémodynamiques de HbO<sub>2</sub> est significativement plus faible ( $F(1.71,15.40) = 6.49, p < .05$ ) lors de la phase d'apprentissage ( $M = 0.22 \mu\text{mol}, \dot{E}-T = 0.59 \mu\text{mol}$ ) que lors du rappel immédiat ( $M = 1.62 \mu\text{mol}, \dot{E}-T = 0.96 \mu\text{mol}$ ), et ce, avec une taille d'effet élevée ( $\omega^2 = .24$ ). Les aires temporales antérieures semblent en effet peu impliquées dans la période d'encodage des mots. Les concentrations de HbO<sub>2</sub> ne diffèrent pas entre l'hémisphère gauche et l'hémisphère droit ( $F(1,9) = 0.06, p = .82$ ), peu importe le processus mnésique dans lequel est engagé le participant ( $F(1.10,9.92) = 0.68, p = .44$ ). En temporal moyen, contrairement aux régions préfrontales et temporales antérieures, les concentrations de HbO<sub>2</sub> ne sont pas significativement différentes lors de l'apprentissage et lors du rappel ( $F(1.81,16.33) = 2.33, p = .13$ ), et ce, du côté gauche comme du côté droit ( $F(1.18,10.65) = 0.16, p = .74$ ). L'analyse de variance montre que la différence hémisphérique n'est pas significative ( $F(1,9) = 0.11, p = .75$ ).

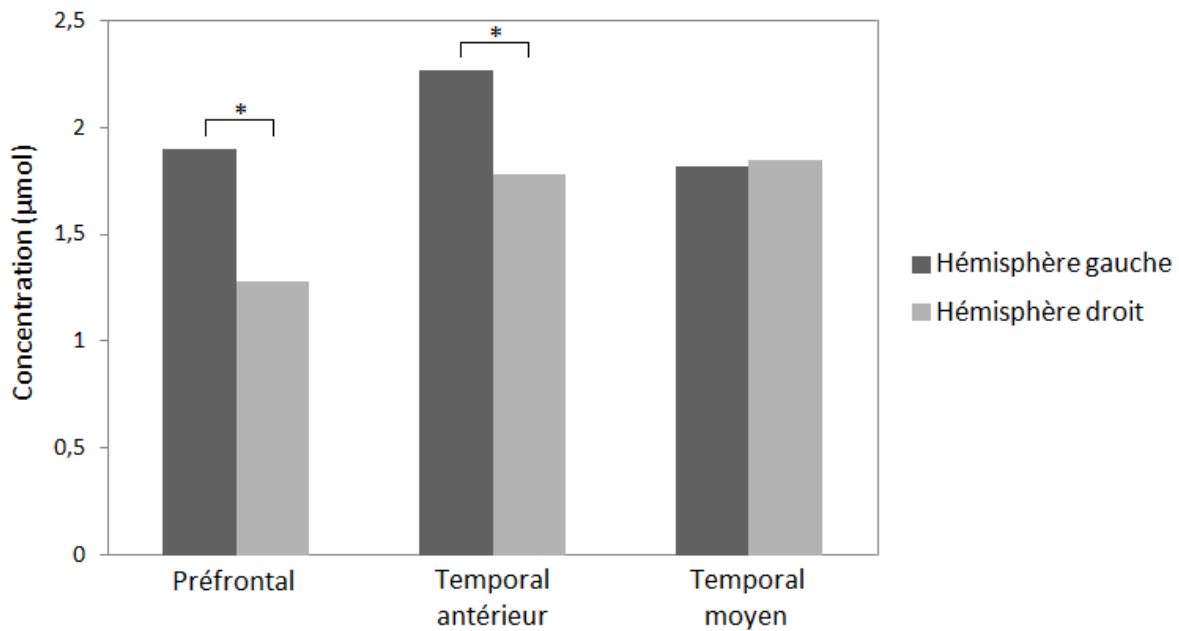
Des ANOVAs à mesures répétées (*temps x hémisphère*) ont été effectuées pour chaque région d'intérêt afin d'évaluer l'effet du moment de l'apprentissage (temps 1, temps 2, temps 3) et de l'hémisphère cérébral sur l'augmentation de HbO<sub>2</sub>. En temporal antérieur, les résultats révèlent un effet du moment de l'apprentissage ( $F(1.93,17,35) = 5.5, p < .05$ ). Bien que la taille d'effet soit élevée ( $\omega^2 = .17$ ) et que les concentrations relatives de HbO<sub>2</sub> aient tendance à être plus élevées lors du premier apprentissage d'une liste, l'effet observé ne résiste pas aux tests à postériori. On ne retrouve pas d'effet d'hémisphère ( $F(1,9) = 3.73, p = .09$ ), ni d'interaction entre les facteurs ( $F(1.57,14.16) = 0.91, p = .40$ ). Dans les régions temporales moyennes, le moment de l'apprentissage ( $F(1.80,16.26) = 3.34, p = .065$ ) et l'hémisphère ( $F(1,9) = 2.86, p = .13$ ) n'ont pas d'effet significatif et l'interaction n'est pas significative ( $F(1.23,11.08) = 0.89, p = .39$ ).

Des analyses comparables ont été effectuées sur les périodes de rappel verbal. Les ANOVAs à mesures répétées (*moment du rappel x hémisphère*) visaient à déterminer si la position du rappel dans le temps ou l'hémisphère dans lequel est enregistrée l'activité hémodynamique avait une influence sur l'amplitude et la latence de cette activité. Dans la région temporale antérieure, l'ANOVA ne montre pas d'effet du moment du rappel ( $F(1.44,13.00) = 2.39, p = .14$ ) sur l'amplitude des concentrations relatives de HbO<sub>2</sub>. Toutefois, des comparaisons par paires avec correction de Bonferroni révèlent une différence significative entre le premier rappel ( $M = 2.03 \mu\text{mol}$ ,  $\acute{E}-T = 0.89 \mu\text{mol}$ ) et le rappel différé ( $M = 1.26 \mu\text{mol}$ ,  $\acute{E}-T = 1.24 \mu\text{mol}$ ). L'amplitude de l'activité hémodynamique a tendance à être plus élevée au premier rappel qu'au dernier rappel (*figure 10*), sans effet ni d'hémisphère ( $F(1,9) = 0.19, p = .68$ ), ni d'interaction ( $F(2.38,21.46) = 1.1, p = .36$ ) entre les facteurs.



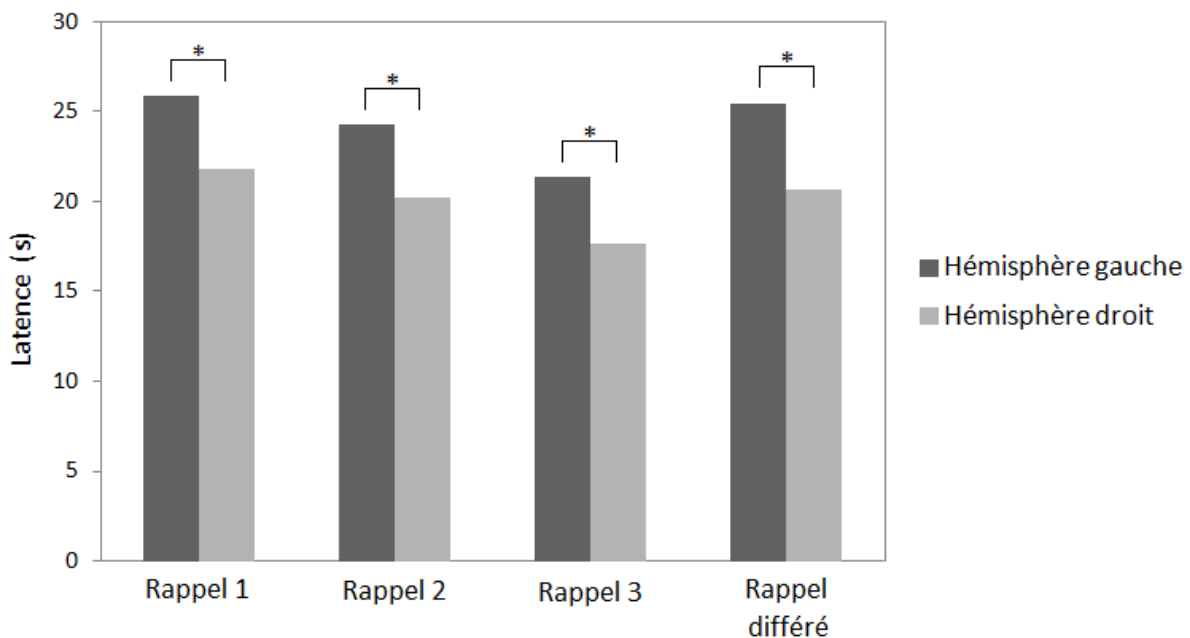
*Figure 10.* Concentrations relatives d'HbO<sub>2</sub> (en μmol) dans les aires temporales antérieures selon le moment du rappel et l'hémisphère cérébral.

Une analyse de variance à mesures répétées (*région d'intérêt x hémisphère*) effectuée spécifiquement sur les concentrations relatives de HbO<sub>2</sub> mesurées au premier rappel montre une activité significativement ( $F(1,9) = 5.82, p < .05$ ) plus grande dans l'hémisphère gauche ( $M = 2 \mu\text{mol}, \acute{E}-T = 0.3 \mu\text{mol}$ ) que dans l'hémisphère droit ( $M = 1.64 \mu\text{mol}, \acute{E}-T = 0.3 \mu\text{mol}$ ), sans effet de la région cérébrale ( $F(1.4,12.6) = 1.11, p = .34$ ). Bien que l'interaction entre l'hémisphère et la région cérébrale ne soit pas significative ( $F(1.7,15.4) = 1.22, p = .32$ ), une latéralisation de l'activité hémodynamique n'est observée qu'en préfrontal et en temporal antérieur, mais pas dans les aires temporales moyennes (*figure 11*).



*Figure 11.* Concentrations relatives d'HbO<sub>2</sub> (en μmol) au premier rappel selon l'aire cérébrale et l'hémisphère.

Les valeurs de latence des maximums de concentration de HbO<sub>2</sub>, quant à elles, ne varient pas en fonction du moment du rappel ( $F(2.47,22.25) = 0.78, p = .50$ ), mais varient en fonction de l'hémisphère ( $F(1,9) = 9.08, p < .05$ ). L'activité hémodynamique atteint son maximum plus rapidement à droite ( $M = 20.08$  s,  $\acute{E}-T = 3.89$  s) qu'à gauche ( $M = 24.24$  s,  $\acute{E}-T = 4.74$  s), et ce, pour tous les moments de rappel ( $F(2.29,20.62) = 0.025, p = .98$ ). La *figure 12* illustre l'effet de latéralisation sur les latences des maximums d'intensité optique selon le moment du rappel. Le pourcentage de variance expliquée par le facteur lié à l'hémisphère est considéré élevé tel que révélé par un oméga carré de .18. Dans la région temporelle moyenne, aucune différence significative liée à la latéralisation ou le moment du rappel n'est observée.



*Figure 12.* Latence des maximums d'intensité optique (en secondes) dans les aires temporelles antérieures selon le moment du rappel et l'hémisphère cérébral.

En résumé, les analyses statistiques effectuées sur les concentrations maximales de HbO<sub>2</sub> enregistrées dans les aires préfrontales gauches et droites sont plus amples en rappel différé que lors de la phase d'encodage. Dans les aires temporales antérieures, l'activité hémodynamique enregistrée semble plus élevée lors du premier apprentissage et du premier rappel que lors des rappels subséquents. L'activité cérébrale lors des rappels est corrélée négativement aux performances : un faible pourcentage de mots correctement rappelés est associé à une activité hémodynamique plus élevée en temporal antérieur gauche. Cette activité est aussi significativement plus importante lorsque le participant doit récupérer les informations (rappel) que lorsqu'il les encode (apprentissage). Le seul effet observé sur la latence concerne les périodes de rappel verbal pour lesquelles l'activité hémodynamique atteint le maximum de son intensité plus rapidement à droite qu'à gauche. Les analyses statistiques effectuées sur les concentrations maximales de HbO<sub>2</sub> dans les aires temporales moyennes ne varient pas selon le processus mnésique en cours ou selon la position de ces derniers dans le temps.



## **Chapitre 4**

### **DISCUSSION**

L'objectif principal de cette étude était de développer un protocole permettant d'investiguer la mémoire verbale, lequel pourrait éventuellement être utilisé chez des patients épileptiques candidats à la chirurgie. La spectroscopie dans le proche infrarouge a été utilisée pour ses avantages par rapport aux autres techniques, notamment sa résistance aux mouvements articulaires. Dix adultes sains ont été soumis à une tâche de mémoire verbale épisodique de listes de mots. La tâche comprenait trois phases : l'encodage, le rappel immédiat et le rappel différé. Dans cette section, les résultats seront discutés selon les thématiques suivantes : performances des participants, effet de primauté et de récence, localisation des activations cérébrales, latéralisation de ces activations, utilisation de la tâche dans un contexte préchirurgical et limites de la SPIR.

#### **4.1 Performances**

Les participants améliorent leurs performances au cours des trois rappels immédiats d'une même liste, puis celles-ci diminuent lors du rappel différé. Les tâches de rappel immédiat nécessitent la contribution de la mémoire à court terme, mais on ne peut savoir dans quelle mesure la mémoire à long terme est impliquée (Cohen, 2008). Il est d'autant plus probable que les mots puissent passer en mémoire à long terme considérant qu'une même liste est encodée et rappelée à trois reprises. Ainsi, il est possible que l'amélioration des performances au cours des rappels immédiats reflète l'implication croissante de la mémoire à long terme. Le rappel différé quant à lui ne peut être effectué que par le biais de la mémoire à long terme (Cohen, 2008), ce qui pourrait expliquer une diminution des performances. Plus d'erreurs sont d'ailleurs commises lors du rappel différé.

La corrélation entre le nombre d'années d'étude complétées et le nombre de mots correctement rappelés lors du rappel différé suggère un lien entre la scolarité et les aptitudes en mémoire verbale à long terme. Zivian & Danes (1983) ont obtenu des résultats similaires lors d'une tâche de rappel libre à l'écrit chez le groupe de participants d'âge moyen (35-50 ans). Le lien entre l'éducation et les performances en mémoire verbale pourrait provenir de meilleures habiletés langagières chez les personnes ayant fait davantage d'années d'étude (Wiley & Harnischfeger, 1974).

#### **4.1.1 Primauté et récence**

L'effet de primauté, à savoir un meilleur rappel des premiers mots d'une liste, est lié au fait que les premiers éléments d'une liste bénéficient d'un plus grand nombre de répétitions et ont donc plus de chance d'être encodés en mémoire à long terme. L'effet de récence, à savoir un meilleur rappel des derniers mots d'une liste, reflèterait plutôt l'accès à la mémoire à court terme des derniers éléments d'une liste (Atkinson & Shiffrin, 1968 ; Rundus, 1971).

Nos résultats montrent un effet de primauté, mais pas d'effet de récence lors du rappel différé. Une explication possible de ce résultat est que la tâche de mémoire non verbale ayant lieu avant la période de rappel différé a mis à contribution la capacité limitée de la mémoire à court terme. Les mots conservés en mémoire à court terme ont été remplacés par le nouveau matériel à encoder, ce qui a pu contribuer à anéantir l'effet de récence. L'effet de primauté quant à lui n'a pas été affecté par la tâche non verbale parce que les mots ont été encodés en mémoire à long terme (Rundus, 1971).

## 4.2 Aires cérébrales activées et latéralisation

Lors de la période d'apprentissage, le participant entend une série de mots qu'il doit encoder en mémoire. Durant cette phase, nous avons enregistré une activation du cortex auditif primaire et des gyri temporaux moyen et supérieur reconnus pour être impliqués dans le traitement auditif des sons de la parole et la compréhension du langage (aire de Wernicke).

Les aires cérébrales activées au moment de l'encodage sont reconnues pour être à nouveau impliquées au moment de la récupération de l'information en mémoire (Polyn, Natu, Cohen & Norman, 2005 ; Wheeler, Petersen & Buckner, 2000). Les résultats de la présente étude abondent en ce sens. En effet, lors du rappel verbal, nous avons observé une réactivation des aires cérébrales qui sont associées au traitement auditif des mots au moment de l'encodage. Les études de Nyberg, Habib, McIntosh et Tulving (2000) et de Wheeler et al. (2000) rapportent des résultats similaires, c'est-à-dire une augmentation bilatérale de l'activité des gyri temporaux moyen et supérieur lors de la récupération de stimuli auditifs. Toutefois, puisque le participant effectue oralement le rappel des mots, il n'est pas possible dans le cadre de la présente étude de distinguer l'activité mnésique associée au rappel de celle pouvant provenir du traitement auditif de sa propre voix. La production orale expliquerait aussi l'activation observée de la partie basse des cortex moteur et somatosensoriel primaires associés à l'exécution et aux aspects sensoriels des mouvements volontaires des muscles du visage. Enfin, nous avons également enregistré des activations dans les régions langagières reconnues pour leur rôle dans la production (aire de Broca), la compréhension (gyrus angulaire), la sémantique et la phonologie (gyrus supramarginal).

Puisque la SPIR a un pouvoir de pénétration limité ( $\approx 3$  cm) et qu'elle mesure l'activité à partir de la surface du crâne, il est difficile de déterminer dans quelle mesure les structures plus médiales telles que l'hippocampe et le gyrus parahippocampique, reconnus pour leur rôle dans les processus mnésiques, ont contribué à l'importante augmentation des concentrations de HbO<sub>2</sub> mesurées à partir de la surface du lobe temporal. Toutefois, rappelons que l'objectif de la présente étude n'était pas d'isoler les régions cérébrales qui sous-tendent les processus mnésiques, mais plutôt de localiser les changements hémodynamiques évoqués par une tâche de rappel verbal.

Les résultats ont révélé que la tâche de rappel verbal immédiat entraîne aussi une hausse de l'activité dans les aires dorsolatérales (AB 9, 46) du cortex préfrontal. Le cortex préfrontal est reconnu pour son rôle crucial dans les fonctions supérieures, dont le maintien de l'attention et la récupération des informations en mémoire. Le fait que cette aire soit impliquée dans le rappel, mais pas dans l'encodage des mots correspond à ce qui a été observé dans plusieurs études sur la mémoire épisodique (voir la revue de Wagner, 1999). Les aires dorsolatérales bilatérales seraient spécifiquement impliquées dans la mémoire de travail, laquelle maintient à court terme l'information pour pouvoir l'utiliser (Blumenfeld & Ranganath, 2007 ; Braver et al., 2001 ; Contini et al. 2013). Selon une revue de Christoff et Gabrieli (2000), le cortex préfrontal dorsolatéral serait impliqué dans la manipulation d'informations externes à soi, dans le cas présent, des mots venant d'être entendus. Tel que rapporté par Matsui et al. (2007), nous avons observé une activité hémodynamique plus ample dans ces régions au moment des rappels que lors de l'encodage. Une activation plus ample au moment du rappel qu'au moment de l'encodage a également été observée dans les aires temporales. Nous interprétons cette hausse de l'activité hémodynamique comme l'indication

d'un recrutement cérébral supplémentaire nécessaire pour compenser la plus grande difficulté du rappel par rapport à l'encodage. Cette interprétation est aussi cohérente avec le niveau d'oxygénation enregistré dans les aires temporales antérieures qui était plus élevé lorsque la liste n'avait pas encore été bien apprise (1<sup>er</sup> rappel) et alors que les performances des participants étaient les plus faibles. Plus la tâche est difficile, plus grand est l'apport en oxygène requis. On s'attend donc à une diminution de l'activation du premier au troisième rappel et à une corrélation négative entre les performances et l'activité hémodynamique. C'est précisément ce que nos résultats en temporal antérieur gauche dévoilent, s'accordant aux résultats de Ohtani, Matsuo, Kasai, Kato et Kato (2005) qui rapportent une diminution des concentrations de HbO<sub>2</sub> au fur et à mesure qu'une même tâche est répétée.

Lors du rappel verbal effectué après la tâche non verbale, des activations ont été enregistrées dans les mêmes régions que celles impliquées dans le rappel immédiat, soit les cortex auditif, moteur et somatosensoriel primaires, les gyri temporaux moyen et supérieur, l'aire de Broca, les gyri angulaire et supramarginal et le cortex préfrontal dorsolatéral. À ces régions s'ajoute l'activation du cortex préfrontal antérieur (AB 10). Le rôle du cortex préfrontal antérieur, aussi appelé cortex frontopolaire, n'est pas encore bien défini. Son activation est observée dans une variété de tâches impliquant les fonctions cognitives de haut niveau, telles que la résolution de problèmes, la planification et le rappel d'informations en mémoire à long terme (Buckner & Koutstaal, 1998 ; Christoff & Gabrieli, 2000 ; Ranganath, Blumenfeld & John, 2008). Dans une tâche de mémoire épisodique, le cortex préfrontal antérieur serait davantage impliqué dans le rappel que dans l'encodage (Ranganath et al., 2008 ; Wagner, 1999) ou la reconnaissance (Christoff & Gabrieli, 2000), et ce, indépendamment du type d'informations traitées (Buckner & Wheeler, 2001 ; Ranganath & Knight, 2003; Ramnani

& Owen, 2004 ; Wagner, 1999). Plusieurs auteurs émettent l'hypothèse que le cortex préfrontal antérieur serait impliqué dans le maintien et la manipulation d'éléments en mémoire de travail (Braver et al., 2001 ; Wagner, 1999) et aurait un rôle spécifique dans la sélection et l'intégration des différentes opérations cognitives (Ranganath et al., 2008 ; Ramnani & Owen, 2004). Dans une revue des études d'imagerie fonctionnelle portant sur la mémoire épisodique et le raisonnement, Christoff et Gabrieli (2000) ont constaté que le cortex préfrontal antérieur était particulièrement impliqué dans des tâches de mémoire dans lesquelles le nombre d'items à retenir excède la taille de l'empan de la mémoire de travail. Selon ces auteurs, l'activité dans cette région pourrait refléter l'utilisation de stratégies d'organisation internes de la mémoire. Alors que le cortex préfrontal dorsolatéral (AB 9,46) serait impliqué dans la manipulation d'informations externes à soi, le cortex préfrontal antérieur contribuerait plutôt au traitement de données générées par soi. Cette vision est cohérente avec les résultats de la présente étude, puisque le rappel verbal différé exige la remémoration de mots encodés en mémoire, lesquels correspondent bien à des informations internes.

En bref, nos résultats confirment notre première hypothèse (H1) voulant que la tâche entraîne une activation hémodynamique bilatérale dans les régions préfrontales et temporales reconnues pour leur implication dans les processus mnésiques.

#### **4.2.1 Latéralisation**

Les niveaux d'activation enregistrés dans le cortex préfrontal étaient similaires dans les deux hémisphères, à l'exception du premier rappel immédiat pour lequel le niveau d'activation hémodynamique était plus élevé à gauche qu'à droite. Nos résultats ne sont donc pas en accord

avec le modèle HERA (*hemispheric encoding/retrieval asymmetry*, Habib, Nyberg & Tulving, 2003) qui nous a menés à émettre les hypothèses selon lesquelles l'activation dans le cortex préfrontal gauche serait plus ample lors de l'encodage, alors que celle dans le cortex préfrontal droit le serait davantage lors du rappel (H3 et H4). Nos résultats appuient plutôt les études qui rapportent des activations bilatérales du cortex préfrontal lors de tâches de mémoire épisodique (Matsui et al., 2007 ; Ragland et al., 2001).

Selon notre deuxième hypothèse (H2), l'activation devait être de plus grande amplitude en temporal gauche qu'en temporal droit. Contrairement à ce qui était attendu, la tâche évoque chez la plupart des participants une réponse temporelle bilatérale. La tâche utilisée implique l'activation des aires temporales gauches, reconnues pour leur traitement préférentiel des éléments langagiers, autant que leurs homologues droits plus souvent associés au traitement du matériel non verbal. Par exemple, le cortex auditif primaire gauche, impliqué dans le traitement des sons de la parole, et le cortex auditif droit, reconnu pour le traitement du rythme et de la prosodie, ont tous deux été sollicités par la tâche. Seule l'activité mesurée lors du premier rappel a tendance à être plus élevée à gauche qu'à droite, et ce, en temporal antérieur seulement.

Une différence hémisphérique inattendue a été observée lors des rappels : l'activité hémodynamique semble atteindre son maximum d'intensité plus rapidement dans l'hémisphère droit que dans l'hémisphère gauche. Ce résultat est difficile à expliquer et pourrait peut-être refléter l'utilisation de stratégies de récupération non verbales qui sont plus rapides que les stratégies verbales plus complexes.



### 4.3 Protocole d'évaluation préchirurgicale

L'un des objectifs de la présente étude était de développer un protocole en imagerie optique permettant de localiser les aires associées à la mémoire verbale. Bien que les résultats obtenus ne soient pas exactement ceux attendus, la tâche pourrait tout de même être utile dans le cadre d'un protocole d'évaluation destiné à mettre en évidence les déficits mnésiques potentiels postchirurgicaux chez des patients épileptiques. Selon le modèle de l'adéquation fonctionnelle (*functional adequation*), l'étendue des déficits en mémoire suivant une chirurgie dépend de l'intégrité des tissus dont on fera l'ablation. Ainsi, une faible implication de la région cérébrale visée par la chirurgie est associée à des déficits moins importants (Chelune, 1995). Cette tâche qui suscite une activation bilatérale chez les sujets sains pourrait être utilisée pour mesurer l'ampleur de la réorganisation interhémisphérique le cas échéant. Par exemple, dans une tâche de rappel de scènes visuelles, Rabin et al. (2004) ont rapporté une activation bilatérale du lobe temporal médian chez les sujets contrôles alors que les patients épileptiques ont présenté une plus faible activité dans la région atteinte par le foyer épileptique. Cette activité ipsilatérale était corrélée négativement aux performances dans la même tâche de mémoire de scènes visuelles à la suite de la chirurgie : les patients dont l'activité du lobe temporal médian atteint par l'épilepsie était la plus faible avant la chirurgie avaient de meilleures performances suite à la celle-ci. Les auteurs ont interprété cette asymétrie mesurée avant la résection comme un indicateur d'un meilleur pronostic postchirurgical selon le modèle de l'adéquation fonctionnelle. La zone visée par la chirurgie étant peu activée lors de la tâche, les déficits mnésiques seraient moins importants suite à la chirurgie.

De façon plus générale, selon Engel, Rausch, Lieb, Khul & Crandall (1981), une forte asymétrie de l'activité lors d'une évaluation préchirurgicale nous donne d'importantes informations sur la latéralité du foyer épileptique. L'activation cérébrale associée à une tâche sera plus faible dans la région touchée par l'épilepsie et plus importante dans la région controlatérale. Des études ont été réalisées dans le but d'investiguer le potentiel de l'IRMf dans la prédiction des effets sur la mémoire d'une résection du lobe temporal antérieur (Rabin et al., 2004; Richardson et al., 2004 ; Janszky et al., 2005; Binder et al., 2008; Powell et al., 2008), mais aucune n'a encore été faite à l'aide de la SPIR. Pourtant cette dernière a l'avantage d'offrir une excellente résolution temporelle ( $< 1s.$ ), d'être moins coûteuse et de ne pas imposer de restriction importante de mouvements lors de l'enregistrement.

#### **4.4 Limites de la SPIR**

Malgré ses nombreux avantages, la spectroscopie proche infrarouge comporte aussi ses limites. Le principal inconvénient de la SPIR dans l'évaluation des processus mnésiques est le pouvoir de pénétration limité des photons dans les tissus. Ainsi, l'activité de certaines régions plus profondes est difficile à quantifier. C'est le cas du lobe temporal médian reconnu pour son implication dans la mémoire et dont les structures sont fréquemment atteintes par l'épilepsie. Il n'existe pas aujourd'hui de technique parfaite. Les faiblesses de l'une sont les forces de l'autre. L'utilisation de plusieurs techniques de manière complémentaires est actuellement à privilégier afin d'obtenir des résultats fiables. Davantage d'études seront requises pour déterminer l'utilisation de la SPIR comme outil d'évaluation préchirurgical de la mémoire.

## 4.5 Conclusion

L'objectif principal de cette étude était de développer un protocole d'évaluation de la mémoire verbale en imagerie optique qui pourrait éventuellement être utilisé chez des patients épileptiques candidats à la chirurgie. Nos résultats suggèrent une activité hémodynamique bilatérale chez des sujets sains dans les régions préfrontales, temporales antérieures et temporales moyennes lors de l'encodage, du rappel immédiat et du rappel différé de listes de mots. Dans le cadre d'une étude future, la tâche développée pourrait être administrée à des patients épileptiques afin de mesurer l'asymétrie de l'activité et de déterminer si celle-ci peut prévoir les déficits mnésiques selon le modèle de l'adéquation fonctionnelle (*functional adequation*). La spectroscopie proche infrarouge est une technique qui offre plusieurs avantages et dont l'utilisation dans un contexte préchirurgical est prometteuse.

## **RÉFÉRENCES**

- Aoki, R., Sato, H., Katura, T., Matsuda, R. & Koizumi, R. (2013). Correlation between prefrontal cortex activity during working memory tasks and natural mood independent of personality effects: An optical topography study. *Psychiatry Research*, 212 (1), 79-87.
- Atkinson, R. C., & Shiffrin, R. M. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. *The psychology of learning and motivation*, 2, 89-195.
- Baciu, M. V., Watson, J. M., Maccotta, L., McDermott, K. B., Buckner, R. L., Gilliam, F. G. (2005). Evaluating functional MRI procedures for assessing hemispheric language dominance in neurosurgical patients. *Neuroradiology*, 47, 835–844.
- Baird, A. A., Kagan, J., Gaudette, T., Walz, K. A. , Hershlag, N. & Boas, D. A. (2002). Frontal lobe activation during object permanence: Data from near-infrared spectroscopy, *NeuroImage*, 16 (4), 1120-1126.
- Baxendale, S. A., Paesschen, W. V., Thompson, P. J., Connelly, A., Duncan, J. S., Harkness, W. F., & Shorvon, S. D. (1998). The relationship between quantitative MRI and neuropsychological functioning in temporal lobe epilepsy. *Epilepsia*, 39(2), 158-166.
- Baxendale, S., Thompson, P. J., & Duncan, J. S. (2008). The role of the Wada test in the surgical treatment of temporal lobe epilepsy: An international survey. *Epilepsia*, 49(4), 715-729.
- Bell, B. D., Davies, K. G., Hermann, B. P., & Walters, G. (2000). Confrontation naming after anterior temporal lobectomy is related to age of acquisition of the object names. *Neuropsychologia*, 38(1), 83-92.

- Binder, J. R. (2011). Functional MRI is a valid noninvasive alternative to Wada testing. *Epilepsy & behavior, 20*(2), 214-22.
- Binder, J. R., Sabsevitz, D. S., Swanson, S. J., Hammeke, T. A., Raghavan, M., & Mueller, W. M. (2008). Use of preoperative functional MRI to predict verbal memory decline after temporal lobe epilepsy surgery. *Epilepsia, 49*(8), 1377–1394.
- Blumenfeld, R. S. & Ranganath, C. (2007). Prefrontal cortex and long-term memory encoding: An integrative review of findings from neuropsychology and neuroimaging. *Neuroscientist, 13*, 280-291.
- Boersma, P. & Weenink, D. (2009). Praat [Logiciel]. Amsterdam : University of Amsterdam.
- Bonelli, S. B., Powell, R. H., Yogarajah, M., Samson, R. S., Symms, M. R., Thompson, P. J., ... & Duncan, J. S. (2010). Imaging memory in temporal lobe epilepsy: predicting the effects of temporal lobe resection. *Brain, 133*(4), 1186-1199.
- Bortfeld, H., Fava, E., & Boas, D. A. (2009). Identifying cortical lateralization of speech processing in infants using near-infrared spectroscopy. *Developmental Neuropsychology, 34*, 52–65.
- Braver, T. S., Barch, D. M., Kelley, W. M., Buckner, R. L., Cohen, N. J., Miezin, F. M., ... & Petersen, S. E. (2001). Direct comparison of prefrontal cortex regions engaged by working and long-term memory tasks. *Neuroimage, 14*(1), 48-59.
- Buckner, R. L. & Koutstaal, W. (1998). Functional neuroimaging studies of encoding, priming, and explicit memory retrieval. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 95*(3), 891-898.

- Buckner, R. L. & Wheeler, M. E. (2001). The cognitive neuroscience of remembering. *Nature Reviews Neuroscience*, 2(9), 624-634.
- Centeno, M., Thompson, P. J., Koepp, M. J., Helmstaedter, C. & Duncan, J. S. (2010). Memory in frontal lobe epilepsy. *Epilepsy Research*, 91(2-3), 123-132.
- Chelune, G. J. (1995). Hippocampal adequacy versus functional reserve: predicting memory functions following temporal lobectomy. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 10(5), 413-432.
- Christoff, K. & Gabrieli, J. D. E. (2000). The frontopolar cortex and human cognition: evidence for a rostrocaudal hierarchical organisation within the human prefrontal cortex. *Psychobiology*, 28, 168-186.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). New Jersey: Lawrence Erlbaum.
- Contini, D., Caffini, M., Re, R., Zucchelli, L., Spinelli, L., Moro, S. B., ... & Torricelli, A. (2013, March). Investigation of verbal and visual working memory by multi-channel time-resolved functional near-infrared spectroscopy. Dans *SPIE BiOS* (pp. 85782Z-85782Z). International Society for Optics and Photonics.
- Detre, J. A., Maccotta, L., King, D., Alsop, D. C., Glosser, G., D'Esposito, M., ... & French, J. A. (1998). Functional MRI lateralization of memory in temporal lobe epilepsy. *Neurology*, 50(4), 926-932.
- Dickerson, B. C. & Eichenbaum, H. (2010). The Episodic Memory System: Neurocircuitry and Disorders. *Neuropsychopharmacology*, 35(1), 86-104.

- Engel, J. (1996). Surgery for seizures. *The New England Journal of Medicine*, 334(10), 647-652.
- Engel, J., Rausch, R., Lieb, J. P., Kuhl, D. E., & Crandall, P. H. (1981). Correlation of criteria used for localizing epileptic foci in patients considered for surgical therapy of epilepsy. *Annals of neurology*, 9(3), 215-224.
- Épilepsie Canada. (2003). Tableau de l'épilepsie. *Épilepsie Canada*. Consulté le 9 septembre 2011 sur <http://www.epilepsy.ca/fr-CA/Epilepsie-Canada.html>.
- Evans, A. C., Collins, D. L., & Milner, B. (1992). An MRI-based stereotaxic atlas from 250 young normal subjects. *Society Neuroscience Abstracts*. 18: 408
- Gallagher, A., Bastien, D., Pelletier, I., Vannasing, P., Legatt, A. D., Moshé, S. L., ... & Lassonde, M. (2008a). A noninvasive, presurgical expressive and receptive language investigation in a 9-year-old epileptic boy using near-infrared spectroscopy. *Epilepsy & Behavior*, 12(2), 340-346.
- Gallagher, A., Béland, R., Vannasing, P., Bringas, M.L., Valdes Sosa, P., Trujillo-Barreto, N., Connolly, J. & Lassonde M. (2008b). *N400 electrophysiological component dissociation between verbal and nonverbal processing: a source analysis study*. Article en préparation.
- Gallagher, A., Lassonde, M., Bastien, D., Vannasing, P., Lesage, F., Grova, C., ... & Nguyen, D. K. (2008c). Non-invasive pre-surgical investigation of a 10 year-old epileptic boy using simultaneous EEG–NIRS. *Seizure*, 17(6), 576-582.



- Gallagher, A., Thériault, M., Maclin, E., Low, K., Gratton, G., Fabiani, M., ... & Lassonde, M. (2007). Near-infrared spectroscopy as an alternative to the Wada test for language mapping in children, adults and special populations. *Epileptic Disord*, 9(3), 241-255.
- Gleißner, U., Helmstaedter, C., & Elger, C. E. (1998). Right hippocampal contribution to visual memory: a presurgical and postsurgical study in patients with temporal lobe epilepsy. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 65(5), 665-669.
- Gratton, G. & Corballis, P.M. (1995). Removing the heart from the brain: compensation for the pulse artefact in the photon migration signal. *Psychophysiology*, 32, 292-99.
- Habib, R. & Nyberg, L. & Tulving, E. (2003). Hemispheric asymmetries of memory: the HERA model revisited. *Trends in Cognitive Sciences*, 7 (6), 241-245.
- Helmstaedter, C. & Elger, C. E. (1996). Cognitive consequences of two-thirds anterior temporal lobectomy on verbal memory in 144 patients: a three-month follow-up study. *Epilepsia*, 37(2), 171-80.
- Hermann, B. P., Seidenberg, M., Haltiner, A. & Wyler, A. R. (1995). Relationship of age at onset, chronologic age, and adequacy of preoperative performance to verbal memory change after anterior temporal lobectomy. *Epilepsia*, 36, 137-145.
- Hermann, B. P., Seidenberg, M., Schoenfeld, J., & Davies, K. (1997). Neuropsychological characteristics of the syndrome of mesial temporal lobe epilepsy. *Archives of Neurology*, 54(4), 369.
- Hermann, B. P., Wyler, A. R., Somes, G., & Clement, L. (1994). Dysnomia after Left Anterior Temporal Lobectomy without Functional Mapping : Frequency and Correlates. *Neuropsychology*, 35, 2-8.

- Hintz, S. R., Benaron, D. A., Siegel, A. M., Zourabian, A., Stevenson, D. K., & Boas, D. A. (2001). Bedside functional imaging of the premature infant brain during passive motor activation. *Journal of Perinatal Medicine*, 29(4), 335-343.
- Hoshi, Y. (2003). Functional near-infrared optical imaging: Utility and limitations in human brain mapping. *Psychophysiology*, 40, 511–520.
- Huppert, T. J., Diamond, S. G., Franceschini, M. A., & Boas, D. A. (2009). HomER: a review of time-series analysis methods for near-infrared spectroscopy of the brain. *Applied optics*, 48(10), D280-D298.
- Janszky, J., Jokeit, H., Kontopoulou, K., Mertens, M., Ebner, A., Pohlmann-Eden, B., & Woermann, F. G. (2005). Functional MRI predicts memory performance after right mesiotemporal epilepsy surgery. *Epilepsia*, 46(2), 244-250.
- Kane, M. J. & Engle, R. W. (2002). The role of prefrontal cortex in working-memory capacity, executive attention, and general fluid intelligence: An individual-differences perspective. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9 (4), 637-671.
- Kim, H., Yi, S., Son, E. I., & Kim, J. (2003). Material-specific memory in temporal lobe epilepsy: Effects of seizure laterality and language dominance. *Neuropsychology*, 17(1), 59-68.
- Keppel, G. (1991). *Design and analysis: A researcher's handbook* . Prentice-Hall, Inc.
- Koike, S., Takizawa, R., Nishimura, Y., Kinou, M., Kawasaki, S. & Kasai, K. (2013). Reduced but broader prefrontal activity in patients with schizophrenia during n-back working memory tasks: A multi-channel near-infrared spectroscopy study, *Journal of Psychiatric Research*, 47(9), 1240-1246.

- Lee, T. M. C., Yip, J. T. H., & Jones-Gotman, M. (2002). Memory deficits after resection from left or right anterior temporal lobe in humans: a meta-analytic review. *Epilepsia*, *43*(3), 283-291.
- Lété, B., Sprenger-Charolles, L., & Colé, P. (2004). MANULEX: A grade-level lexical database from French elementary school readers. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, *36*(1), 156-166.
- Liebert, A., Wabnitz, H., Steinbrink, J., Möller, M., Macdonald, R., Rinneberg, H., et al. (2005). Bed-side assessment of cerebral perfusion in stroke patients based on optical monitoring of a dye bolus by time-resolved diffuse reflectance. *NeuroImage*, *24*(2), 426-435.
- Matsui, M., Tanaka, K., Yonezawa, M., & Kurachi, M. (2007). Activation of the prefrontal cortex during memory learning: near-infrared spectroscopy study. *Psychiatry and clinical neurosciences*, *61*(1), 31-38.
- Miller, E. K. & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual review of neuroscience*, *24*(1), 167-202.
- Milner, B., Branch, C., & Rasmussen, T. (1962). Study of short-term memory after intracarotid injection of sodium amytal. *Transactions of the Neurological Association*, *87*, 224-226.
- New, B., Pallier, C., Ferrand, L., & Matos, R. (2001). Une base de données lexicales du français contemporain sur internet: LEXIQUE™. *L'année Psychologique*, *101*(3), 447-462.

- Nyberg, L., Habib, R., McIntosh, A. R., & Tulving, E. (2000). Reactivation of encoding-related brain activity during memory retrieval. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *97*(20), 11120-11124.
- Ohtani, T., Matsuo, K., Kasai, K., Kato, T., & Kato, N. (2005). Hemodynamic response to emotional memory recall with eye movement. *Neuroscience letters*, *380*(1), 75-79.
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh Inventory. *Neuropsychologia*, *9*, 97-113.
- Organisation Mondiale de la Santé. (2005). *Atlas: Epilepsy care in the world*, Genève (Suisse), OMS.
- Ort́ega, ́., & L´et´e, B. (2010). eManulex: Electronic version of Manulex and Manulex-infra databases. <http://www.manulex.org>.
- Pellicer, A., del Carmen Bravo, M. (2011). Near-infrared spectroscopy: A methodology-focused review. *Seminars in fetal & neonatal medicine*, *16*(1), 42-49.
- Pelletier, I., Sauerwein, H. C., Lepore, F., Saint-Amour, D., & Lassonde, M. (2007). Non-invasive alternatives to the Wada test in the presurgical evaluation of language and memory functions in epilepsy patients. *Epileptic disorders*, *9*(2), 111-126.
- Polyn, S. M., Natu, V. S., Cohen, J. D., & Norman, K. A. (2005). Category-specific cortical activity precedes retrieval during memory search. *Science*, *310* (5756), 1963-1966.
- Powell, H. R., Richardson, M. P., Symms, M. R., Boulby, P. A., Thompson, P. J., Duncan, J. S., & Koepp, M. J. (2008). Preoperative fMRI predicts memory decline following

- anterior temporal lobe resection. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 79(6), 686-693.
- Rabin, M. L., Narayan, V. M., Kimberg, D. Y., Casasanto, D. J., Glosser, G., Tracy, J. I., ... & Detre, J. A. (2004). Functional MRI predicts post-surgical memory following temporal lobectomy. *Brain*, 127(10), 2286-2298.
- Ragland, J. D., Gur, R. C., Raz, J., Schroeder, L., Kohler, C. G., Smith, R. J., ... & Gur, R. E. (2001). Effect of schizophrenia on frontotemporal activity during word encoding and recognition: a PET cerebral blood flow study. *American Journal of Psychiatry*, 158(7), 1114-1125.
- Ramnani, N. & Owen, A. M. (2004). Anterior prefrontal cortex: insights into function from anatomy and neuroimaging. *Nature Reviews Neuroscience*, 5(3), 184-194.
- Ranganath, C., and R. S. Blumenfeld. "Prefrontal cortex and memory." *J. Byrne (Series Ed.), & H. Eichenbaum (Vol. Ed.), Learning and memory: A comprehensive reference 3* (2008): 261-280.
- Ranganath, C., & Knight, R. T. (2002). Prefrontal cortex and episodic memory: Integrating findings from neuropsychology and functional brain imaging. *The cognitive neuroscience of memory: Encoding and retrieval*, 1, 83.
- Richardson, M. P., Strange, B. A., Thompson, P. J., Baxendale, S. A., Duncan, J. S., & Dolan, R. J. (2004). Pre-operative verbal memory fMRI predicts post-operative memory decline after left temporal lobe resection. *Brain*, 127(11), 2419-2426.
- Rundus, D. (1971). Analysis of rehearsal processes in free recall. *Journal of experimental psychology*, 89(1), 63.

- Sato, H., Yahata, N., Funane, T., Takizawa, R., Katura, T., Atsumori, H., ... & Kasai, K. (2013). A NIRS-fMRI investigation of prefrontal cortex activity during a working memory task. *NeuroImage*.
- Sabsevitz, D. S., Swanson, S. J., Morris, G. L., Mueller, W. M., & Seidenberg, M. (2001). Memory outcome after left anterior temporal lobectomy in patients with expected and reversed Wada memory asymmetry scores. *Epilepsia*, 42(11), 1408-15.
- Sato, H., Aoki, R., Katura, T., Matsuda, R & Koizumi, H. (2011). Correlation of within-individual fluctuation of depressed mood with prefrontal cortex activity during verbal working memory task: optical topography study. *Journal of Biomedical Optics*, 16(12), 126007.
- Seghier, M. L. (2008). Laterality index in functional MRI: methodological issues. *Magnetic resonance imaging*, 26(5), 594-601.
- Serap, S., Tapsin, M., & Akin, A. (2009). Investigating brain hemodynamics of ADHD patients by functional near infrared spectroscopy. In *Engineering in Medicine and Biology Society, 2009. EMBC 2009. Annual International Conference of the IEEE* (pp. 3028-3030). IEEE.
- Signoret J.L. (1991). *Batterie d'efficience mnésique. BEM144*. Paris, France: Elsevier.
- Spiers, H. J., Burgess, N., Maguire, E. A., Baxendale, S. A., Hartley, T., Thompson, P. J., & O'Keefe, J. (2001). Unilateral temporal lobectomy patients show lateralized topographical and episodic memory deficits in a virtual town. *Brain*, 124(12), 2476-2489.

- Squire, L. R. & Zola-Morgan, J. T. (1991). The cognitive neuroscience of human memory since HM. *Annual review of neuroscience*, 34, 259.
- Suto, T., Fukuda, M., Ito, M., Uehara, T. & Mikuni, M. (2004). Multichannel near-infrared spectroscopy in depression and schizophrenia: cognitive brain activation study. *Biological psychiatry*, 55 (5), 501-511.
- Tanida, M. & Sakatani, K. (2013). Prefrontal brain activity evaluated by using quantitative time-resolved near infrared spectroscopy during working memory task. *Clinical Neurophysiology*, 124 (8), e22.
- Télez-Zenteno, J. F., Dhar, R., & Wiebe, S. (2005). Long-term seizure outcomes following epilepsy surgery: a systematic review and meta-analysis. *Brain*, 128(5), 1188-1198.
- Tremblay, J. (2012). Article en préparation.
- Tsujimoto, S., Yamamoto, T., Kawaguchi, H., Koizumi, H., & Sawaguchi, T. (2004). Prefrontal cortical activation associated with working memory in adults and preschool children: an event-related optical topography study. *Cerebral cortex*, 14(7), 703-712.
- Vannest, J., Szaflarski, J. P., Privitera, M. D., Schefft, B. K., & Holland, S. K. (2008). Medial temporal fMRI activation reflects memory lateralization and memory performance in patients with epilepsy. *Epilepsy & Behavior*, 12(3), 410-418.
- Villringer, A. & Chance, B. (1997). Non-invasive optical spectroscopy and imaging of human brain function. *Trends in neurosciences*, 20(10), 435-442.

- Villringer, A., Planck, J., Hock, C., Schleinkofer, L., & Dirnagl, U. (1993). Near infrared spectroscopy (NIRS): a new tool to study hemodynamic changes during activation of brain function in human adults. *Neuroscience Letters*, *154(1-2)*, 101-4.
- Wada, J. & Rasmussen, T. (1960). Intracarotid injection of sodium amytal for the lateralization of cerebral speech dominance: experimental and clinical observations. *Journal of Neurosurgery*, *17(2)*, 266-282.
- Wagner, A. D. (1999). Working memory contributions to human learning and remembering. *Neuron*, *22*, 19-22.
- Watanabe, E., Maki, A., Kawaguchi, F., Takashiro, K., Yamashita, Y., Koizumi, H., & Mayanagi, Y. (1998). Non-invasive assessment of language dominance with near-infrared spectroscopic mapping. *Neuroscience letters*, *256(1)*, 49-52.
- Wheeler, M. E., Petersen, S. E., & Buckner, R. L. (2000). Memory's echo: Vivid remembering reactivates sensory-specific cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *97(20)*, 11125-11129.
- Wiebe, S. T., Blume, W., Girvin, J. P., & Eliasziw, M. (2001). A Randomized, controlled trial of surgery for temporal-lobe epilepsy. *The New England Journal of Medicine*, *345(5)*, 311-318.
- Wiley, D. E. & Harnischfeger, A. (1974). Explosion of a myth: Quantity of schooling and exposure to instruction, major educational vehicles. *Educational Researcher*, *3(4)*, 7-12.
- Yuan, W., Szaflarski, J. P., Schmithorst, V. J., Schapiro, M., Byars, A. W., Strawsburg, R. H., & Holland, S. K. (2006). fMRI shows atypical language lateralization in pediatric epilepsy patients. *Epilepsia*, *47(3)*, 593-600.



Zivian, M. T. & Danes, R. W. (1983). Free Recall by In-School and Out-of-School Adults:  
Performance and Metamemory. *Developmental Psychology*, 19 (4), 513-520.

**Annexe A**

**TEST DE DOMINANCE MANUELLE**

Code de recherche : \_\_\_\_\_

Date: \_\_\_\_\_

EDINBURGH HANDEDNESS INVENTORY  
(Oldfield, 1971)

- \* Mettre ++ si main exclusive
- \* Mettre + si main préférentielle
- \* Mettre + dans chaque colonne si les deux mains sont utilisées indifféremment

	G	D
1. Écrire	_____	_____
2. Dessiner	_____	_____
3. Lancer une balle	_____	_____
4. Utiliser des ciseaux	_____	_____
5. Utiliser la brosse à dents	_____	_____
6. Couper avec un couteau (seul)	_____	_____
7. Tenir un balai (main du haut)	_____	_____
8. Frotter une allumette	_____	_____
9. Tenir une cuillère pour manger de la soupe	_____	_____
10. Ouvrir un pot de confiture (main qui tient le couvercle)	_____	_____
	_____	_____
	Total G	Total D

$$\frac{\text{Total D ( )} - \text{Total G ( )}}{\text{Total D} + \text{G ( )}} \times 100 = \underline{\hspace{2cm}}$$

<u>Gaucher absolu</u>	<u>Ambidextre</u>	<u>Droitier absolu</u>
-100	0	+100

Indiquer quels sont les membres de la famille proche qui sont gauchers ou ambidextres:

Père: \_\_\_\_ Mère: \_\_\_\_ Fratrie: \_\_\_\_ (Nb)/ \_\_\_\_ (Nb total)

**Annexe B**

**QUESTIONNAIRE SUR L'HISTOIRE MÉDICALE**

CODE DE RECHERCHE: \_\_\_\_\_

DATE: \_\_\_\_\_

### HISTOIRE MÉDICALE

Est-ce que vous souffrez ou avez souffert de :

	Oui	Non	Si oui, spécifiez:
Convulsions fébriles et/ou épilepsie ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Perte de conscience ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Méningite ou encéphalite ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Diabète ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Problèmes de sommeil ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Traumatismes crâniens ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Trouble déficitaire de l'attention/hyperactivité ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Troubles langagiers ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____
Troubles neurologiques ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	_____

• État de la vision (si corrigée, expliquez) : \_\_\_\_\_

• État de l'audition (si corrigée, expliquez) : \_\_\_\_\_

• Problèmes de santé sérieux? (nécessitant une hospitalisation ou une opération)

\_\_\_\_\_ Date \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ Date \_\_\_\_\_

• Prenez-vous des médicaments? Si oui, pour quelles raisons?

\_\_\_\_\_

• Avez-vous souvent mal à la tête ou une sensibilité à la tête?

\_\_\_\_\_

• Avez-vous consommé de l'alcool ou de la drogue hier?

Si oui, spécifiez : \_\_\_\_\_

• Avez-vous consommé de l'alcool ou de la drogue aujourd'hui?

Si oui, spécifiez : \_\_\_\_\_