



HAL
open science

Processus centraux et périphériques en production écrite de mots : études comportementales, en neuroimagerie fonctionnelle et par stimulation magnétique transcrânienne

Samuel Planton

► **To cite this version:**

Samuel Planton. Processus centraux et périphériques en production écrite de mots : études comportementales, en neuroimagerie fonctionnelle et par stimulation magnétique transcrânienne. Neurosciences. Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2014. Français. NNT : . tel-01392506

HAL Id: tel-01392506

<https://hal.science/tel-01392506>

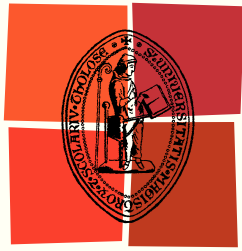
Submitted on 10 Nov 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License



Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

Présentée et soutenue par :

Samuel Planton

le mardi 10 juin 2014

Titre :

Processus centraux et périphériques en production écrite de mots : études comportementales, en neuroimagerie fonctionnelle et par stimulation magnétique transcrânienne

École doctorale et discipline ou spécialité :

ED CLESCO : Neuropsychologie

Unité de recherche :

Inserm UMR 825 & URI Octogone (EA4156)

Directeur(s) de Thèse :

Jean-François DEMONET
Christiane SOUM-FAVARO

Jury :

Sonia KANDEL (rapporteuse)
Ferath KHERIF (rapporteur)
Marina LAGANARO (examinatrice)
Jérémy PARIENTE (examineur)

REMERCIEMENTS

Je remercie mes directeurs de thèse : Jean-François Démonet, qui a accepté de me confier la mise en œuvre de ce projet de recherche et laissé me l'approprier en m'exprimant toujours sa confiance, et Christiane Soum, qui m'a initié à la linguistique et apporté son aide précieuse et ses conseils tout au long de ce travail.

Je remercie sincèrement Sonia Kandel et Ferath Kherif d'avoir manifesté de l'intérêt pour ce travail en acceptant de le lire et de le commenter ainsi que Marina Laganaro et Jérémie Pariente de participer au jury de ma soutenance de thèse.

Je remercie Pierre Celsis qui m'a accueilli dans l'unité Inserm 825, ainsi que tous les membres de l'unité et toutes les personnes extérieures avec qui j'ai été amené à collaborer.

Je remercie tout particulièrement Mélanie Jucla, qui m'a accompagné et soutenu tout au long de mon travail, tant au plan humain qu'au niveau scientifique.

J'adresse tous mes remerciements à tous les participants qui ont eu la gentillesse et parfois le courage de participer à mes différentes expérimentations.

Je remercie naturellement ma famille pour leurs encouragements et leur présence au quotidien ainsi que ma compagne pour sa patience et son soutien indéfectible.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION.....	11
PREMIERE PARTIE : ETAT DE L'ART	17
CHAPITRE I : LANGAGE ECRIT : APPROCHE COGNITIVE ET PSYCHOLINGUISTIQUE	19
I. LES MODELES COGNITIFS DE LA PRODUCTION ECRITE	19
I.1. Les processus centraux	19
I.2. Les processus périphériques	27
I.3. Modèles alternatifs l'accès orthographique.....	30
II. L'ETUDE DE LA PRODUCTION ECRITE DE MOTS EN PSYCHOLINGUISTIQUE : QUESTIONS LATENTES..	34
II.1. La question de l'autonomie orthographique en dénomination	34
II.2. Les déterminants des latences en production écrite de mots.....	37
II.3. La question de la transmission de l'information entre les différents niveaux dans les modèles de production du langage.....	44
CHAPITRE II : LES BASES CEREBRALES DU LANGAGE ECRIT	49
I. INTRODUCTION : LANGAGE ET CERVEAU.....	49
I.1. De l'aphasiologie à la neuroimagerie fonctionnelle.....	49
I.2. Neuroimagerie de la lecture.....	52
II. LES AGRAPHIES.....	54
II.1. Historique.....	54
II.2. Les agraphies centrales.....	55
II.3. Les agraphies périphériques.....	57
II.4. Syndrome du buffer graphémique	58
III. NEUROIMAGERIE DE L'ECRITURE	60
III.1. Premiers travaux : le réseau cérébral de l'écriture manuscrite.....	60
III.2. L'identification des « centres de l'écriture »	61
III.3. Travaux récents : processus centraux de l'écriture	64
IV. APPORTS DES TECHNIQUES DE STIMULATION CEREBRALE	67
IV.1. Stimulation corticale directe et écriture	67
IV.2. Stimulation magnétique transcrânienne, langage et écriture.....	70
CHAPITRE III : PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS GENERAUX.....	73
I. PROCESSUS CENTRAUX ET PERIPHERIQUES : CONCEPTION SERIELLE OU EN CASCADE ?.....	73
I.1. Les limites de l'analyse de la consistance.....	74
I.2. Le buffer graphémique et l'effet de longueur	75
I.3. Effet de la position de l'irrégularité	76

II.	NEUROANATOMIE DES PROCESSUS CENTRAUX ET PERIPHERIQUES DE L'ECRITURE	77
II.1.	Etudier le réseau cérébral de l'écriture en neuroimagerie	77
II.2.	Rôle de la GMFA dans l'écriture : à l'interface des processus centraux et périphériques ?.....	79
II.3.	Rôle du cortex pariétal supérieur dans l'écriture	80
SECONDE PARTIE : DONNEES EXPERIMENTALES		83
CHAPITRE IV : METHODES ET OUTILS D'INVESTIGATION		85
I.	L'IMAGERIE PAR RESONANCE MAGNETIQUE (IRM).....	85
I.1.	La résonance magnétique nucléaire	85
I.2.	Le signal BOLD	85
I.3.	Les protocoles expérimentaux en IRMf	86
II.	LA STIMULATION MAGNETIQUE TRANSCRANIENNE (TMS).....	87
II.1.	Principes de base	88
II.2.	Effets de la TMS	89
II.3.	Détermination de la cible et guidage	90
III.	ANALYSE DES DONNEES COMPORTEMENTALES EN PSYCHOLINGUISTIQUE.....	90
III.1.	Les temps de réaction	90
III.2.	Modèles linéaires mixtes.....	92
CHAPITRE V : ORGANISATION TEMPORELLE DES PROCESSUS COGNITIFS DE L'ECRITURE -		
APPROCHE PSYCHOLINGUISTIQUE		95
I.	EXPERIMENTATION PRELIMINAIRE : EFFETS DE REGULARITE EN ECRITURE DE MOTS SOUS DICTEE..	95
I.1.	Introduction	95
I.2.	Matériel et Méthode	96
I.3.	Résultats.....	101
I.4.	Discussion.....	106
I.5.	Conclusion.....	111
II.	MESURES DE CONSISTANCE PHONO-ORTHOGRAPHIQUE SUR UN LARGE ECHANTILLON D'ITEMS ..	112
II.1.	Introduction	112
II.2.	Méthode de calcul	114
II.3.	Description des données et discussion	115
III.	EXPERIMENTATION : EFFETS DE CONSISTANCE PHONO-ORTHOGRAPHIQUE EN ECRITURE DE MOTS	
SOUS DICTEE		116
III.1.	Matériel et méthode.....	117
III.2.	Résultats partie 1 : analyse des erreurs	120
III.3.	Résultats partie 2 : analyse de la dynamique de l'écriture.....	123
III.4.	Discussion.....	130
III.5.	Conclusion.....	138

CHAPITRE VI : META-ANALYSE DES TRAVAUX SUR L'ECRITURE EN NEUROIMAGERIE.....	139
PREAMBULE	139
I. INTRODUCTION	142
I.1. The "handwriting brain"	142
I.2. Controlling for motor response	144
I.3. Controlling for linguistic/input processes	144
II. META-ANALYSIS.....	146
II.1. Materials & Method.....	146
II.2. Results.....	149
III. DISCUSSION.....	153
III.1. Writing "specific" areas.....	153
III.2. "Extended" handwriting network.....	157
III.3. Further questions	162
IV. CONCLUSION.....	165
CHAPITRE VII : EXPERIMENTATION IRMf 1 : EFFETS DE LONGUEUR DE MOTS EN	
PRODUCTION ECRITE SOUS DICTEE	167
I. INTRODUCTION	167
II. MATERIEL ET METHODE.....	169
II.1. Participants	169
II.2. Critères d'exclusion et recrutement	170
II.3. Paradigme expérimental	170
II.4. Stimuli	173
II.5. Acquisition IRMf et analyse des données.....	174
III. RESULTATS	177
III.1. Données comportementales.....	177
III.2. Données de neuroimagerie.....	179
IV. DISCUSSION.....	185
IV.1. Le réseau cérébral de l'écriture	185
IV.2. Aires motrices et langagières de l'écriture.....	187
IV.3. Aires cruciales pour l'écriture ?	189
IV.4. Conclusion.....	192
CHAPITRE VIII : EXPERIMENTATION IRMf 2 : EFFETS D'AGE D'ACQUISITION EN	
DENOMINATION ECRITE	193
I. INTRODUCTION	193
II. EXPERIMENTATION COMPORTEMENTALE PRELIMINAIRE.....	196
II.1. Tâche de dénomination écrite.....	197
II.2. Tâche de dessin	200

II.3.	Conclusion.....	203
III.	EXPERIMENTATION IRMf 2 : MATERIEL ET METHODE.....	204
III.1.	Sélection des stimuli : tâche de dénomination écrite.....	204
III.2.	Sélection des stimuli : tâche de dessin.....	205
III.3.	Participants	206
III.4.	Critères d'exclusion et recrutement	206
III.5.	Paradigme expérimental.....	206
III.6.	Acquisition IRMf et analyse des données.....	209
IV.	EXPERIMENTATION IRMf 2: RESULTATS	210
IV.1.	Données comportementales.....	210
IV.2.	Données de neuroimagerie.....	212
V.	DISCUSSION.....	219
V.1.	Ecriture de mots vs. Dessin d'images.....	220
V.2.	Aires dédiées aux processus centraux en écriture et en épellation.....	222
V.3.	Effets de l'âge d'acquisition.....	224
V.4.	Conclusion.....	225

CHAPITRE IX : ROLE FONCTIONNEL DE LA GMFA ET DU CORTEX PARIETAL SUPERIEUR DANS		
L'ECRITURE : EXPERIMENTATION PAR rTMS.....227		
I.	INTRODUCTION	227
I.1.	Tâches comportementales.....	228
I.2.	Hypothèses.....	230
II.	MATERIEL ET METHODE.....	232
II.1.	Participants	232
II.2.	Critères d'inclusion et d'exclusion.....	232
II.3.	Identification de la cible de stimulation.....	233
II.4.	Procédure.....	236
II.5.	Tâches comportementales.....	239
III.	RESULTATS : GROUPE DE STIMULATION GMFA	244
III.1.	Ecriture sous dictée	244
III.2.	Tâche de Stroop à l'écrit	249
III.3.	Tâche de barrage	253
IV.	DISCUSSION : GROUPE DE STIMULATION GMFA.....	254
IV.1.	Résultats comportementaux indépendamment de la stimulation	254
IV.2.	Effets comportementaux de la stimulation de la GMFA	256
IV.3.	Conclusion.....	258
V.	RESULTATS : GROUPE DE STIMULATION CPS	259
V.1.	Ecriture sous dictée	259
V.2.	Tâche de Stroop à l'écrit	263

V.3.	Tâche de barrage	267
VI.	DISCUSSION : GROUPE DE STIMULATION CPS.....	268
VI.1.	Résultats comportementaux indépendamment de la stimulation	268
VI.2.	Effets comportementaux de la stimulation du CPS	268
VII.	EXPERIMENTATION rTMS: SYNTHÈSE ET CONCLUSION	271
VII.1.	Les limites de l'étude	271
VII.2.	Des effets distincts selon le site de stimulation ?	272
VII.3.	Conclusion.....	274
SYNTHÈSE & CONCLUSION		277
CHAPITRE X : SYNTHÈSE ET DISCUSSION GÉNÉRALE		279
I.	INTERACTION DES PROCESSUS CENTRAUX ET PÉRIPHÉRIQUES EN PRODUCTION ÉCRITE.....	279
I.1.	L'influence de la régularité sur les latences et les vitesses d'écriture en production écrite sous dictée de mots isolés.....	280
I.2.	L'écriture manuscrite, un objet d'étude complexe.....	283
II.	LE RÉSEAU CÉRÉBRAL DE L'ÉCRITURE MANUSCRITE.....	284
II.1.	Un réseau cérébral vaste mis en évidence par la neuroimagerie.....	284
II.2.	Traitement de l'entrée et récupération de la représentation orthographique	285
II.3.	Aires du contrôle moteur de l'écriture	288
II.4.	Les centres fronto-pariétaux de l'écriture.....	289
CHAPITRE XI : PERSPECTIVES ET CONCLUSION		291
I.	L'ÉTUDE DE L'ÉCRITURE EN PSYCHOLINGUISTIQUE.....	291
I.1.	Vers une base de données étendue des mesures de consistance	291
I.2.	La question des déterminants centraux des processus périphériques et moteurs de l'écriture.....	292
II.	DEVELOPPER LES MÉTHODES D'ÉTUDE DE LA NEUROANATOMIE DE L'ÉCRITURE	293
II.1.	Étudier l'écriture en IRMf.....	293
II.2.	Apports futurs de la technique de TMS	294
II.3.	Écriture et connectivité.....	295
REFERENCES.....		299
Table des figures.....		317
Table des tableaux.....		321
ANNEXES.....		323
Résumé		363

**INTRODUCTION
GENERALE**

L'écriture est définie comme un « système de marques plus ou moins permanentes servant à représenter un énoncé d'une manière telle qu'il puisse être récupéré plus ou moins précisément sans l'intervention de l'énonciateur » (Daniels, 1996). Il s'agit donc d'une fonction *langagière* qui dépasse la simple représentation schématique d'une idée à partir d'une image qui n'aurait pas une forme linguistique spécifique (pictogramme). L'écriture est une invention culturelle apparue relativement tardivement dans l'histoire de l'espèce humaine car si les hommes communiquent par le langage oral depuis 50 000 à 100 000 ans, les premières formes d'écriture ne sont attestées que depuis environ 3 400 ans avant notre ère. C'est dans la ville sumérienne d'Uruk, en Mésopotamie, que l'on est progressivement passé de pictogrammes visuels représentant des formes aisément reconnaissables à des signes logographiques, abstraits et arbitraires (ou idéogrammes). Cette écriture « cunéiforme » (ces signes, dessinés dans l'argile fraîche à l'aide d'une branche de roseau taillé en pointe forment des « coins ») s'est ensuite répandue dans le Proche-Orient, et c'est pour l'adapter à leur langue que les Akkadiens de Babylone, vers 2 000 avant J-C, constituèrent les premiers caractères syllabiques. Les graphèmes cunéiformes étaient désormais utilisés pour représenter les sons syllabiques de la langue akkadienne (Lecours, 1996).

Différents systèmes d'écriture sont aujourd'hui utilisés à travers le monde, distingués selon leurs différentes façons de transcrire par des symboles graphiques les sons de la langue (et susceptibles de reposer sur des circuits cérébraux partiellement distincts Bolger, Perfetti, & Schneider, 2005; Tan, Laird, Li, & Fox, 2005). Dans un système d'écriture *logographique*, chaque graphème unique représente un mot (ou plus généralement une unité de sens, un morphème) et n'est donc pas directement lié à sa prononciation (e.g. caractères chinois, Kanjis japonais). Dans un système d'écriture *syllabique*, les caractères désignent des syllabes particulières, sans nécessairement qu'il y ait de similarité graphique entre les caractères de syllabes phonétiquement proches (e.g. Kanas japonais). Enfin les écritures *alphabétiques* que nous utilisons présentent des caractères distincts pour désigner les voyelles et les consonnes (e.g. caractères latins, cyrilliques, grecs ; certaines variantes existent comme les caractères arabes ne représentant que les consonnes). Dans le système alphabétique, chaque graphème transcrit donc un phonème (i.e. représentation mentale d'un son de parole). Pourtant, le français comporte 37

phonèmes (ce chiffre peut varier, notamment en fonction des accents régionaux, ou la prise en compte des importations de mots étrangers) contre seulement 26 lettres. On utilise en effet souvent des groupes de lettre (digraphes) pour transcrire certains phonèmes (e.g. *ch, ou, gn, on*) ou des graphèmes identiques pour transcrire différents phonèmes (*car / cent, ville / fille*). C'est en réalité tout un ensemble de règles (i.e. l'orthographe), comportant souvent des exceptions, qui régissent les correspondances entre les sons de parole et les lettres (entre les phonèmes et les graphèmes, ou inversement). Le degré de systématisme de ces règles varie de plus selon les langues, faisant du français une langue particulièrement *opaque* (ou irrégulière), comme l'anglais, quand d'autres langues sont considérées plus *transparentes* (e.g. italien, turc, finnois). La production orthographique est donc en français une compétence particulièrement complexe, apprise après un long apprentissage, voire jamais complètement maîtrisée.

Au-delà de la capacité à récupérer la *forme orthographique* des mots, via un ensemble de processus cognitifs que l'on qualifie de « centraux », l'écriture repose nécessairement sur la capacité à transformer cette représentation en une trace graphique, par le biais d'une séquence de mouvements, réalisée par un effecteur et à l'aide d'un outil (la plume, le stylo, le clavier, etc.). On qualifie ces dernières étapes de « périphériques ». L'écriture est donc aussi une habileté motrice, un geste, acquis par apprentissage, qui a considérablement évolué depuis les marques laissées dans l'argile par la pointe de la branche de roseau et qui évolue encore largement aujourd'hui. Nous sommes en effet passés de l'invention de la machine à écrire au XIX^{ème} siècle à une multiplication exponentielle de l'usage des claviers d'ordinateur, de smartphones, de tablettes, jusqu'à envisager aujourd'hui l'abandon de l'enseignement de l'écriture cursive traditionnelle avec le couple papier-crayon (« La fin de l'écriture » ; *Courrier International*, n°1194 ; 18/09/2013). Bien que son importance soit bien souvent négligée, par rapport au langage oral, acquis précocement et de manière plus « naturelle » ou implicite (l'écriture fait l'objet d'un apprentissage explicite et relativement tardif), la communication par l'écriture prend en effet de plus en plus de place dans notre vie de tous les jours. Son rôle crucial pour communiquer est particulièrement ressenti lorsqu'elle dysfonctionne : lors de troubles de l'apprentissage (dyslexie, dysorthographe), de pathologies dégénératives (maladie de Parkinson, maladie d'Alzheimer) ou suite à diverses formes de lésions cérébrales (accidents vasculaires cérébraux, tumeurs cérébrales).

Les troubles acquis de l'écriture, ou « agraphies » (certains auteurs préféreront le terme de « dysgraphies »), sont aussi l'occasion pour les chercheurs d'en apprendre énormément sur le « fonctionnement » de cette compétence – par exemple, existe-t-il des systèmes cognitifs différents pour lire et écrire des mots connus et familiers ou des mots nouveaux jamais précédemment rencontrés (Caramazza, 1988), pour produire à l'écrit des lettres ou des chiffres

(Anderson, Damasio, & Damasio, 1990) – comme sur les régions cérébrales qui sont impliquées – régions du langage oral ou des aires distinctes, spécifiques de l'écriture (e.g. Roeltgen, 2003). Depuis la « phrénologie » de Franz Joseph Gall (1758-1828), initiant l'idée qu'à chaque fonction mentale correspond une partie du cortex cérébral, la localisation anatomique des différentes fonctions du langage a en effet fait l'objet d'un nombre considérable de travaux dont la découverte par Paul Broca (1824-1880) d'un « centre de la parole » dans le cortex frontal gauche est considérée comme le point de départ. La recherche du « centre de l'écriture » est, elle, beaucoup moins développée, et la proposition de Sigmund Exner (1846-1926) de l'existence d'un tel centre dans le cortex frontal, encore aujourd'hui controversée. Le caractère « culturel » et relativement récent de l'écriture à l'échelle de l'évolution permet en effet de douter que des modifications génétiques suffisamment notables soient survenues pour adapter les circuits cérébraux en vue de la réalisation d'une telle tâche. Pourtant, comme cela est le cas pour la capacité à déchiffrer l'écriture d'autrui (la lecture), nous verrons que la neuroimagerie fonctionnelle moderne permet de répondre à bien des questions sur l'implémentation des processus d'écritures au sein des régions du cerveau, dont certaines apparaissent relativement spécialisées.

L'écriture manuscrite est donc une activité composite, qui nécessite la mise en œuvre de tout un ensemble de compétences, langagières (préparation du message) et motrices (réalisation du geste graphique). C'est par conséquent un objet d'étude multiforme et les chercheurs qui l'étudient, quel que soit leur champ de compétence, linguistique, psychologie cognitive, neurosciences, doivent donc souvent cibler leurs investigations sur un ou plusieurs niveaux d'étude particuliers. Nous avons ici souhaité nous intéresser à l'écriture manuscrite cursive en français, en nous restreignant à la production de mots isolés chez le sujet sain et donc en nous situant sur les niveaux orthographiques et graphomoteurs plutôt que sur les aspects rédactionnels de plus haut niveau (i.e. de planification d'un récit narratif). Ainsi tout au long de ce travail nous chercherons par une approche pluridisciplinaire à mettre au jour certains des mécanismes cognitifs qui rendent possible le processus d'écriture, et, tout particulièrement, nous chercherons à identifier et à comprendre le rôle des différentes structures cérébrales impliquées.

La première partie sera consacrée à dresser un état de l'art dans les différents domaines de connaissance qui seront abordés dans notre travail. Nous décrirons dans le **Chapitre I** les principaux modèles cognitifs développés pour étudier la production écrite du langage, puis détaillerons certains des enjeux actuels de la recherche en psycholinguistique. Nous tenterons ensuite dans le **Chapitre II** de faire un bilan de nos connaissances actuelles sur les bases

cérébrales de l'écriture en évoquant les tous premiers travaux issus de l'étude des patients agraphiques jusqu'aux données de neuroimagerie les plus récentes. Nous exposerons enfin dans le **Chapitre III** les différentes questions théoriques intégrant la problématique générale de ce travail et qui ont motivé la réalisation de différentes expérimentations qui seront présentées par la suite.

La seconde partie sera dédiée à la présentation détaillée des différents travaux expérimentaux qui ont été conduits. Après un rapide aperçu des principaux outils et méthodes d'investigation ayant été utilisés tout au long de notre travail (**Chapitre IV**), nous présenterons dans le **Chapitre V** deux expérimentations de psycholinguistique utilisant une tâche d'écriture sous dictée de mots isolés sur tablette graphique. Ces expérimentations visent à contribuer à un débat sur l'organisation temporelle des processus cognitifs de l'écriture en étudiant sa dynamique (temps de latences et vitesses d'écriture notamment). Ce chapitre inclura la présentation d'un travail d'identification et de dénombrement des différents phonèmes et graphèmes utilisés dans l'écriture en français pour calculer le degré de régularité orthographique (ou *consistance*) des mots du français à deux positions particulières (début et fin des mots). Nous aborderons ensuite les aspects neuroanatomiques de l'écriture en débutant par la description des résultats d'un travail de méta-analyse des travaux publiés dans la littérature sur l'écriture en neuroimagerie fonctionnelle chez le sujet sain (**Chapitre VI**). Les deux chapitres suivants seront consacrés à la présentation de deux expérimentations utilisant l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf). Celles-ci viseront à identifier les substrats cérébraux des différents processus impliqués dans l'écriture en utilisant une tâche d'écriture sous dictée (**Chapitre VII**) et une tâche de dénomination écrite d'images (**Chapitre VIII**), chacune combinée à une tâche de langage oral (répétition orale ou épellation) et une tâche motrice (traçage ou dessin). Ces deux expérimentations seront aussi l'occasion de tester certaines hypothèses relatives à la longueur orthographique des mots pour la première, et à l'âge d'acquisition des mots écrits pour la seconde. La dernière étude, présentée dans le **Chapitre IX**, impliquera l'emploi de la technique de stimulation magnétique transcrânienne chez le sujet sain, en combinaison avec des tâches écrites, dans le but de chercher à mieux comprendre le rôle fonctionnel de deux aires du cortex frontal et pariétal supérieur particulièrement impliquées dans l'écriture.

Dans une dernière partie et en guise de conclusion nous tenterons d'établir une synthèse des travaux menés en tentant de les inclure dans la lignée des travaux précédents (**Chapitre X**), pour enfin terminer en proposant différentes perspectives de recherches qui permettraient, selon nous, de dépasser certaines des limites de nos travaux et ainsi d'approfondir nos connaissances (**Chapitre XI**).

PREMIERE PARTIE



ETAT DE L'ART

CHAPITRE I : LANGAGE ECRIT : APPROCHE COGNITIVE ET PSYCHOLINGUISTIQUE

Dans ce premier chapitre, nous nous efforcerons de dresser un état de nos connaissances concernant les principaux mécanismes cognitifs permettant la production du langage écrit. Nous détaillerons les différentes classes de processus cognitifs mobilisés lors de l'écriture selon les principaux modèles développés en psychologie cognitive, et servant de base à l'étude tant psycholinguistique que neuroanatomique de cette compétence. Nous présenterons dans un second temps plusieurs des différents enjeux et certains résultats récents issus de la recherche sur la production écrite de mots en psycholinguistique, un champ d'étude qui s'appuie sur l'analyse fine du comportement pour tester des hypothèses sur l'architecture fonctionnelle des modèles.

I. LES MODELES COGNITIFS DE LA PRODUCTION ECRITE

De la même manière que la production orale, la production verbale écrite débute par l'intention de communiquer un concept et se concrétise par l'exécution de mouvements : l'articulation orale ou le tracé graphique. L'enjeu principal de la recherche en psycholinguistique ou en neuropsychologie cognitive du langage est la constitution de modèles symboliques décrivant les différentes étapes du traitement de l'information, les mécanismes et les processus cognitifs mis en œuvre, pour aboutir à ce résultat. De manière générale, les modèles de la production écrite de mots distinguent selon Bonin (2003) trois niveaux de traitement : conceptuel/sémantique, orthographique et post-orthographique. Ces deux premiers niveaux ayant trait à la préparation du message, ce sont des processus langagiers ou de mémoire que l'on qualifie de « processus centraux ». Le niveau post-orthographique concernant plutôt la réalisation et le contrôle de la production graphique (motrice) de l'écriture, que l'on englobe sous le terme de « processus périphériques ».

I.1. Les processus centraux

L'orthographe d'un mot peut être récupérée avec succès dans différents contextes, qui varient selon l'« entrée » (e.g. conceptuelle dans l'écriture spontanée, auditive dans l'écriture

sous dictée, visuelle dans la dénomination écrite d'images), ou selon la « sortie » (e.g. écriture manuscrite, écriture tapuscrite, épellation orale), mais on peut considérer que toutes ces situations impliquent de récupérer une même représentation orthographique abstraite. S'inspirant des modèles à double voie de la lecture (Coltheart, Curtis, Atkins, & Haller, 1993; Morton & Patterson, 1980), les modèles classiques de la production écrite distinguent généralement deux voies d'accès à la représentation orthographique d'un mot à écrire : une voie lexicale, récupérant de manière globale l'orthographe des mots connus, et une voie sous-lexicale (ou phonologique) qui récupère celle-ci par assemblage de petites unités (Caramazza, Miceli, Villa, & Romani, 1987; Ellis, 1982, 1988; Hillis & Caramazza, 1991; Rapp, Epstein, & Tainturier, 2002).

I.1.1. La voie lexicale et la représentation orthographique

Dans le modèle de production orthographique sous dictée de Rapp et al. (2002) (voir aussi Tainturier & Rapp, 2001), la voie lexicale (ou voie d'adressage) comporte plusieurs étapes distinctes (voir Figure I-1, à gauche). Lorsqu'un mot est entendu, le produit de son traitement acoustique va aboutir dans un lexique phonologique d'entrée. Il s'agit d'un lieu de stockage à long terme des formes phonologiques des mots connus par le sujet. Si la forme phonologique du mot entendu est reconnue et une représentation phonologique récupérée, l'activation pourra se transmettre vers une autre mémoire à long terme dédiée au sens des mots : le système sémantique. Le système sémantique stocke un ensemble d'informations concernant l'objet en question, parfois distinguées entre propriétés perceptives et fonctionnelles, et permet ici d'accéder, dans l'étape suivante, à la *représentation orthographique* correspondante. Les représentations orthographiques, ou graphémiques, stockées dans le lexique orthographique ont été initialement imaginées comme des séquences linéaires de lettres abstraites, représentant un mot entier (Caramazza et al., 1987; Wing & Baddeley, 1980). En réalité, les performances de certains patients, présentant un déficit au niveau du buffer graphémique (i.e. mémoire tampon servant à stocker temporairement la représentation orthographique pendant l'exécution motrice) suggèrent un encodage plus complexe.

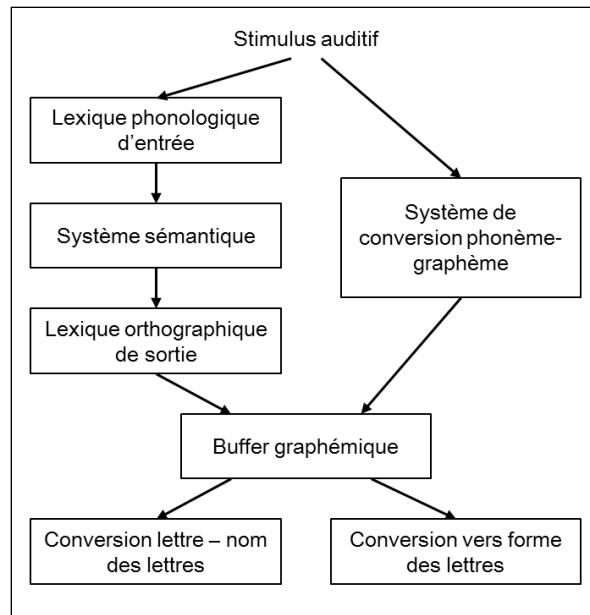


Figure I-1 : Modèle de production orthographique sous dictée à double voie de Rapp et al. (2002)

Le patient agraphique décrit par Badecker, Hillis, et Caramazza (1990), qui semblait présenter des taux d’erreurs plus importants sur la fin des mots (un effet de la position sérielle des lettres est prédit par un déficit du buffer graphémique, nous y reviendrons plus loin), montrait en effet un pattern d’erreur différent sur les mots plurimorphémiques (comportant des préfixes, des suffixes, ou mots composés) : le taux d’erreur chutait au début de chaque morphème. Ce résultat a été interprété comme une indication que les unités récupérées dans le lexique orthographique étaient les morphèmes plutôt que le mot entier. Une analyse détaillée des erreurs produites par un autre patient agraphique réalisée par Caramazza et Miceli (1990) a montré que la structure syllabique a aussi son importance. Les erreurs produites par ce patient (e.g. omissions d’une lettre) n’apparaissaient pas au hasard et conduisaient en effet souvent à simplifier la structure syllabique du mot plutôt qu’à la complexifier. Ils proposent ainsi la notion de graphosyllabe, encodant la structure des syllabes orthographiques (la syllabe est à la base plutôt une notion traitant de la structure phonologique des mots). Chez des sujets sains, il a été montré que la durée séparant l’écriture d’une lettre de l’écriture de la lettre suivante au sein d’un même mot était plus longue lorsqu’elle correspondait à une frontière syllabique (Kandel, Alvarez, & Vallée, 2006). Un même résultat est obtenu chez l’enfant avec des mots « monosyllabiques » mais comportant deux syllabes orthographiques (du type "barque" ; Kandel, Hérault, Grosjacques, Lambert, & Fayol, 2009). Ces résultats démontrent ainsi l’importance de l’unité « syllabe » dans la structuration de la représentation orthographique en production écrite.

D’autres travaux ont montré que l’information sur les géminées (doublage des lettres) était stockée indépendamment de l’identité des lettres. Certains patients pouvant présenter un

déficit sélectif sur la production de doubles lettres (e.g. « LETRE ») (Miceli, Benvegnù, Capasso, & Caramazza, 1995) alors que d'autres, malgré des perturbations de l'identité ou de l'ordre des lettres, conservaient visiblement cette information ("jazz" écrit "JAFF" ; Tainturier & Caramazza, 1996). Enfin, plusieurs chercheurs ont rapporté que les erreurs de substitution (i.e. lettre remplacée par une autre) produites par les patients atteints par ce type de déficit respectaient le plus souvent la catégorie, consonne ou voyelle, de la lettre initiale. Un déficit se traduisant par une omission de toutes les voyelles des mots écrits a même été décrit (Cubelli, 1991).

En résumé, la représentation orthographique posséderait une structure multidimensionnelle encodant des informations sur la structure morphologique du mot, sa structure graphosyllabique, l'identité des lettres et leur statut (voyelle ou consonne) et l'éventuelle présence de lettres doublées.

La voie lexicale ou lexico-sémantique décrite dans le modèle de Rapp et al. (2002) suggère que l'accès à la représentation orthographique passe nécessairement par la récupération du concept dans la mémoire sémantique (Figure I-1). En réalité, plusieurs des modèles de production verbale proposent l'existence d'une voie asémantique, faisant un lien direct entre la représentation phonologique d'entrée et le lexique orthographique de sortie (c'est le cas des modèles de Caramazza et al., 1987; et de Ellis, 1988; voir figures I-2 et I-3 ci-après). L'existence de cette voie expliquerait par exemple la production d'erreur d'homophones hétérographes lors de la dictée (e.g. « vingt » au lieu de « vain ») chez des sujets sains, ou les performances de patients capables d'écrire correctement sous dictée tout en étant incapables de dénommer, voire de comprendre la signification du mot écrit (Patterson, 1986; Rapcsak & Rubens, 1990).

Le lexique orthographique utilisé en production écrite serait pour plusieurs chercheurs spécifique à cette modalité, c'est pourquoi il est souvent désigné comme « lexique orthographique de sortie », par opposition au « lexique orthographique d'entrée » utilisé dans la lecture pour identifier des mots écrits (Caramazza et al., 1987). Certains patients présentent en effet une dissociation entre les performances en lecture et en écriture, telle qu'une agraphie lexicale sans alexie, un trouble de l'écriture sans trouble de la lecture, ou inversement (Baxter & Warrington, 1985; Beauvois & Dérouesné, 1981). D'autres auteurs postulent plutôt l'existence d'un lexique orthographique unique, central. Les troubles lexicaux en lecture et écriture étant en réalité très souvent associés. Les erreurs observées chez certains patients en lecture et/ou écriture résulteraient d'atteintes de la voie d'entrée ou de la voie de sortie, qui constitueraient deux voies d'accès distinctes au lexique orthographique (Friedman & Hadley, 1992).

I.1.2. La voie phonologique

La voie lexicale fait donc appel à un lexique orthographique pour produire l'orthographe de mots familiers, même irréguliers, mais elle ne peut être utilisée pour produire des mots inconnus ou des pseudo-mots car ceux-ci ne possèdent pas de représentation orthographique stockée en mémoire. Nous sommes pourtant tout à fait capables de produire une orthographe plausible pour un mot jamais entendu auparavant. Certains patients en sont néanmoins incapables et, malgré une capacité préservée à écrire correctement des mots irréguliers connus, présentent des difficultés pour écrire des pseudo-mots (e.g. Beauvois & Derouesne, 1979; Roeltgen, Sevush, & Heilman, 1983). Il a ainsi été postulé l'existence d'un système de conversion des phonèmes en graphèmes permettant de récupérer l'orthographe d'un mot entendu : la voie phonologique (ou voie d'assemblage, ou voie sous-lexicale). Dans le modèle de Caramazza, Miceli, Villa, et Romani (1987) ci-dessous (Figure I-2), si l'écriture, ou l'épellation orale d'un mot entendu entraîne l'implication du système lexico-sémantique (ou plus directement le lexique orthographique de sortie) lorsque ce mot est connu et familier, c'est une voie phonologique qui sera mobilisée lorsque celui-ci est nouveau ou inconnu.

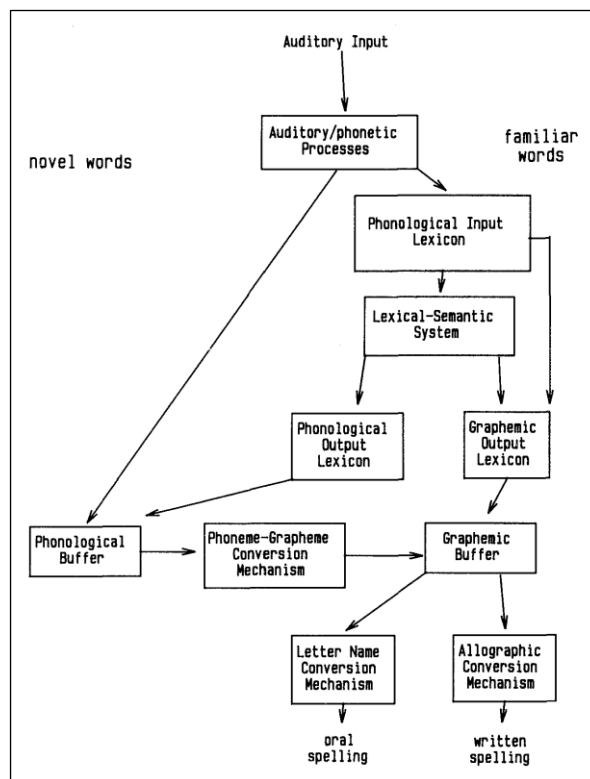


Figure I-2 : Modèle de production orthographique sous dictée de Caramazza et al. (1987)

Ce type de modèles proposent une première étape dans laquelle l'entrée acoustique va être segmentée en petites unités fonctionnelles, qui, parfois par le biais d'une récupération dans

un stock phonologique, vont être identifiées en tant que phonèmes. Chaque unité phonologique va ensuite pouvoir être convertie en son unité orthographique correspondante, puis les unités orthographiques sont assemblées pour générer une représentation graphémique abstraite (sous la forme d'une séquence de graphèmes). On considère généralement que ce mécanisme de conversion se base sur les correspondances phonème-graphème les plus fréquentes dans la langue : les correspondances les plus probables étant plus souvent sélectionnées. Dans des langues à l'orthographe opaque comme le français on constate parfois la production d'*erreurs phonologiquement plausibles*, traduisant le recours à la voie phonologique en présence d'un mot irrégulier non connu. Le choix des correspondances graphème-phonème peut aussi s'appuyer sur des règles positionnelles (e.g. le phonème /k/ en anglais n'est jamais transcrit {ck} en début de syllabe mais il peut l'être en fin de syllabe comme dans LUCK) et contextuelles (e.g. {gu} pour traduire le phonème /g/ devant en E ou un I) (Goodman-Schulman & Caramazza, 1987; Goodman & Caramazza, 1986). Certains auteurs ont suggéré l'utilisation d'unités plus larges, telles la syllabe, pour cette procédure de conversion, mais il semble bien que le phonème soit tout de même l'unité dominante (Perry & Ziegler, 2004).

Les modèles de la lecture, tels que le modèle de Patterson (1986), proposent de manière similaire l'existence de deux voies pour permettre la prononciation d'un mot lu : une voie lexico-sémantique (ou voie d'adressage) et une voie de conversion grapho-phonémique (voie d'assemblage). Certaines composantes telles que le système sémantique seraient ainsi communes à la lecture et à l'écriture. Certains auteurs ont ainsi proposé des modèles de production du langage, tels que le modèle d'Ellis (1988), présenté dans la Figure I-3, intégrant les deux types de voies de la lecture et de l'écriture et prenant à la fois en compte la nature de l'entrée : mot écrit (lecture) ou entendu ; et la nature de la sortie : parole ou écriture. Ce modèle introduit en outre différentes étapes post-orthographiques de l'écriture (niveau allographique et niveau des patterns moteurs graphiques) dont il sera question plus loin.

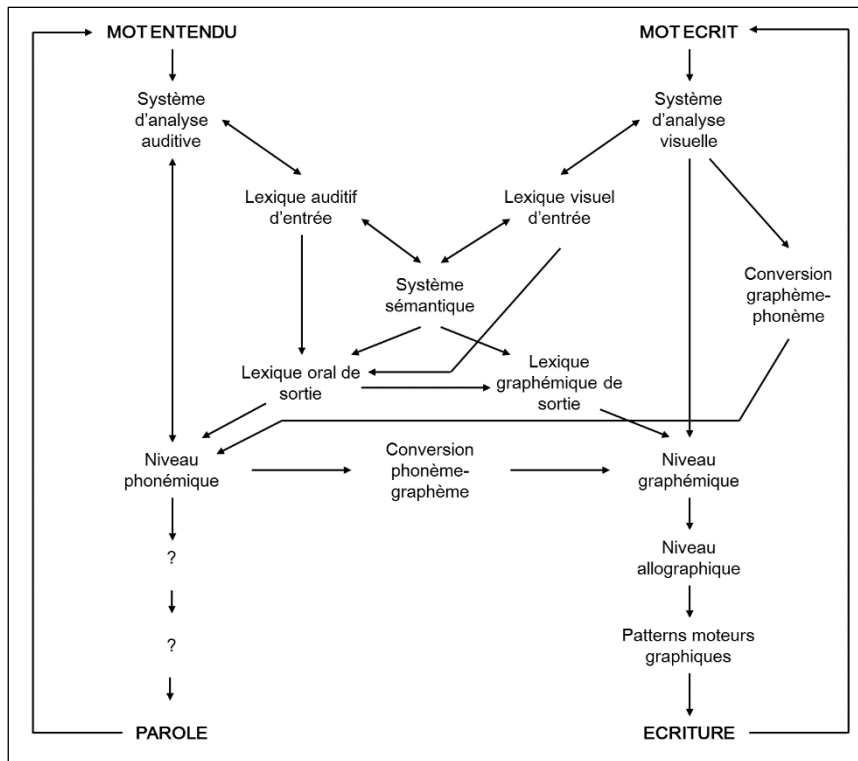


Figure I-3 : Modèle de Ellis (1988)

I.1.3. Intégration des deux voies

Si les voies lexicales et phonologiques ont plutôt été conçues comme fonctionnant de manière totalement indépendante (Ellis, 1982), certains auteurs ont proposé que la représentation lexicale sélectionnée puisse résulter d'un « somme » de l'activation des deux voies (Hillis & Caramazza, 1991; Miceli, Capasso, & Caramazza, 1994). Selon cette conception, la voie phonologique peut être utilisée pour contraindre la sortie de la voie lexicale, évitant ainsi des erreurs sémantiques. Ainsi le patient décrit par Hillis et Caramazza (1991) commettait des erreurs sémantiques en dénomination d'images, lorsque la voie lexicale était uniquement engagée, mais il était capable d'orthographier les mêmes mots en écriture sous dictée, parfois même s'ils étaient irréguliers. Ce comportement traduit selon les auteurs qu'une combinaison du résultat de la procédure de conversion phonème-graphème et de la voie lexicale partiellement lésée a permis de sélectionner la réponse correcte dans le lexique orthographique de sortie.

Rapp et al. (2002) ont décrit le cas du patient LAT, qui produisait fréquemment à l'écrit des erreurs phonologiquement plausibles (e.g. « knowledge » orthographié KNOLIDGE), signe apparent d'une perturbation de la voie lexicale. Pourtant, ils ont remarqué que certaines de ces erreurs comportaient des relations phonème-graphème rares, quoique « lexicalement » correctes (e.g. le phonème /n/ était orthographié KN dans KNOLIDGE). Cela était pourtant moins

le cas lors de l'écriture de pseudo-mots appariés sous dictée. Ce résultat s'expliquerait par un affaiblissement chez LAT de la voie lexicale, mais dont on peut encore observer la trace de l'influence. En utilisant un paradigme d'amorçage, Campbell (1983) avait déjà montré que la production orthographique de pseudo-mots chez le sujet sain était influencée par la présence d'une amorce lexicale (pseudo-mot /prein/ épilé « prain » si le mot « brain » vient d'être entendu). Suite à la description du cas de LAT et à des travaux antérieurs, Rapp et al. (2002) ont donc proposé une architecture du système orthographique normal dans lequel les processus lexicaux et sous-lexicaux contribuent tous les deux à la production orthographique (voir Figure I-4).

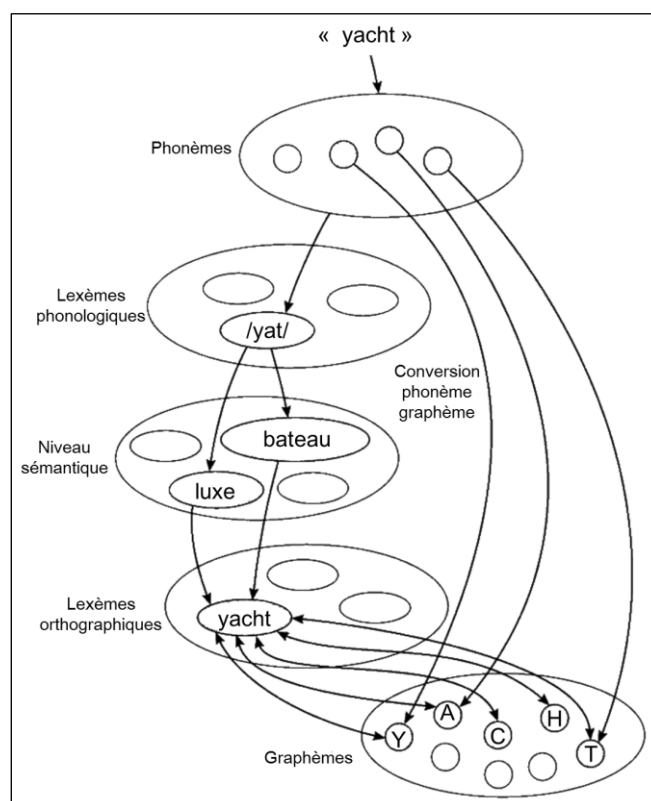


Figure I-4 : Intégration de l'information lexicale et sous-lexicale dans le modèle de Rapp et al. (2002)

Selon cette proposition, les processus lexicaux et sous-lexicaux intégreraient l'information au niveau d'une couche graphémique (pouvant grossièrement correspondre au buffer graphémique, bas de la figure). Cette couche consiste en un ensemble d'éléments (lettres uniques ou « digraphes ») qui encodent globalement l'identité des graphèmes et leur position sérielle. On distingue en amont la voie lexicale, qui inclut successivement le lexique phonologique d'entrée, le système sémantique et le lexique orthographique de sortie, ainsi que la voie phonologique, de conversion des phonèmes en graphèmes. Les deux voies seraient toutes deux recrutées par le stimulus phonologique à orthographier, et « voteraient pour » ou

activeraient les éléments graphémiques candidats parmi un même ensemble d'éléments disponibles.

Ce n'est qu'une fois toutes ces étapes centrales dédiées à la « préparation du message », phonologiques, sémantiques et orthographiques, engagées que vont pouvoir débiter les étapes dédiées à sa transformation en un tracé graphique.

I.2. Les processus périphériques

I.2.1. Le buffer graphémique

Dans la plupart des modèles préalablement évoqués, les représentations orthographiques issues des deux voies aboutissent dans une mémoire tampon : le buffer graphémique. Le buffer graphémique, qui a pu être désigné sous le terme de « mémoire de travail orthographique », est un composant crucial des modèles cognitifs de la production écrite puisqu'il est à la fois le point d'arrivée des processus centraux, aboutissant à la récupération de la représentation orthographique, et le point de départ des processus périphériques, du niveau « post-orthographique ». C'est pourquoi nous préférons souvent nous y référer en tant que processus situé à *l'interface* entre processus centraux et périphériques, plutôt que comme composante à part entière des processus centraux ou des processus périphériques. Les classifications neuropsychologiques des agraphies tendent cependant à classer le syndrome du buffer graphémique dans les agraphies périphériques (e.g. Roeltgen, 2003).

Le rôle du buffer graphémique est de maintenir actives les représentations orthographiques pendant leur prise en charge par les processus périphériques ayant trait à la programmation motrice (Caramazza et al., 1987; Hillis & Caramazza, 1989; Miceli & Silveri, 1985; Posteraro, Zinelli, & Mazzucchi, 1988). Il peut ainsi être impliqué aussi bien dans l'écriture manuscrite, l'écriture tapuscrite (i.e. sur clavier d'ordinateur), que dans l'épellation orale. Il a été intégré aux modèles cognitifs de la production écrite suite à la description de patients cérébro-lésés présentant un type particulier d'erreurs. Un déficit du buffer graphémique se traduit généralement par des omissions, des substitutions, des insertions ou des déplacements de lettres (révélant une dégradation de l'encodage spatial de la séquence de graphèmes composant le mot), sans lien avec des facteurs lexicaux comme la fréquence lexicale du mot, ou phono-orthographiques comme sa régularité. En réalité des travaux plus récents suggèrent qu'une influence de facteurs lexicaux comme la fréquence ou l'âge d'acquisition des mots puissent tout de même avoir une influence sur les erreurs de ces patients (Sage & Ellis, 2004). Il s'agirait dans ce cas-là de phénomènes d'influence « top-down », tels que prévus par des modèles

d'organisation en cascade des différents niveaux de traitement. L'activation lexico-orthographique renforcée pour des mots très fréquents se répercuterait jusqu'au niveau du buffer graphémique (les différents niveaux ne seraient pas résolus de manière indépendante) en renforçant l'activation des unités composant ce type de mots.

Quoi qu'il en soit, le buffer graphémique étant une mémoire de travail ayant pour rôle de maintenir une quantité d'information limitée pendant une durée limitée, le taux d'erreurs chez ces patients atteints de déficits du buffer graphémique augmente avec la longueur des mots (ou des pseudo-mots) produits. Comme évoqué précédemment, les représentations graphémiques gérées par le buffer graphémique ne seraient pas constituées d'une simple succession ordonnées de lettres mais encoderaient en réalité une structure à plusieurs dimensions : l'identité du graphème, sa position dans le mot, sa catégorie (consonne ou voyelle), une information sur la gémination (doublement de consonnes), ainsi que la structure morphologique et graphosyllabique du mot (Badecker et al., 1990; Caramazza & Miceli, 1990; McCloskey, Badecker, Goodman-Schulman, & Aliminosa, 1994).

I.2.2. Niveau allographique et niveau des patterns moteurs

Pour la production de l'écriture manuscrite qui nous intéresse ici (des processus différents seront impliqués dans le cas de l'épellation orale par exemple), la représentation orthographique abstraite nécessite d'être transformée en une sortie motrice, se manifestant par l'exécution d'un tracé sur le papier. Les modèles classiques proposent qu'au moins deux niveaux de représentations indépendants interviennent à ce stade : le niveau de la représentation allographique et le niveau des patterns moteurs graphiques (Ellis, 1982; modèle de Ellis, 1988 présenté dans la figure I-3; Margolin, 1984). Le niveau allographique (Margolin parle de « code physique des lettres ») concerne la forme globale de la lettre, en particulier la casse (majuscule vs. minuscule) et le style graphique (écriture cursive vs. en lettres d'imprimerie). Bien que rare, la description de patients présentant un trouble affectant sélectivement les lettres minuscules ou majuscules, supporte l'idée de l'existence d'un stock allographique indépendant (De Bastiani & Barry, 1989; Patterson & Wing, 1989).

Le niveau suivant est dédié à la récupération des patterns moteurs graphiques, soit de la séquence de mouvements requis pour produire le mot. Ces patterns représentent la séquence de « strokes », qui sont les traits, caractérisés par une certaine taille, une certaine direction, et une certaine vitesse, composant chaque allographe. Ainsi des troubles caractérisés par des substitutions de lettres spatialement similaires, jusqu'à la production de tracés désorganisés, de

lettres incomplètes, en l'absence de troubles praxiques, ont été interprétés comme relevant d'une atteinte de cette composante (Baxter & Warrington, 1986; Ellis, 1988).

Le modèle hiérarchique proposé par Van Galen (voir Figure I-5) ne propose pas de distinction entre un niveau allographique et un niveau des patterns moteurs indépendants (Van Galen, 1991). Il conçoit la sélection des allographes comme l'activation des programmes moteurs correspondant à la représentation graphémique (i.e. stockée dans le buffer graphémique) et au mode d'écriture (e.g. écriture cursive en minuscules). Cela passe par une mémoire, ou un répertoire, à long-terme, stockant les programmes moteurs correspondants et par un processus de conversion des graphèmes en allographes (désignés comme « codes spatiaux » pour diriger le mouvement d'écriture).

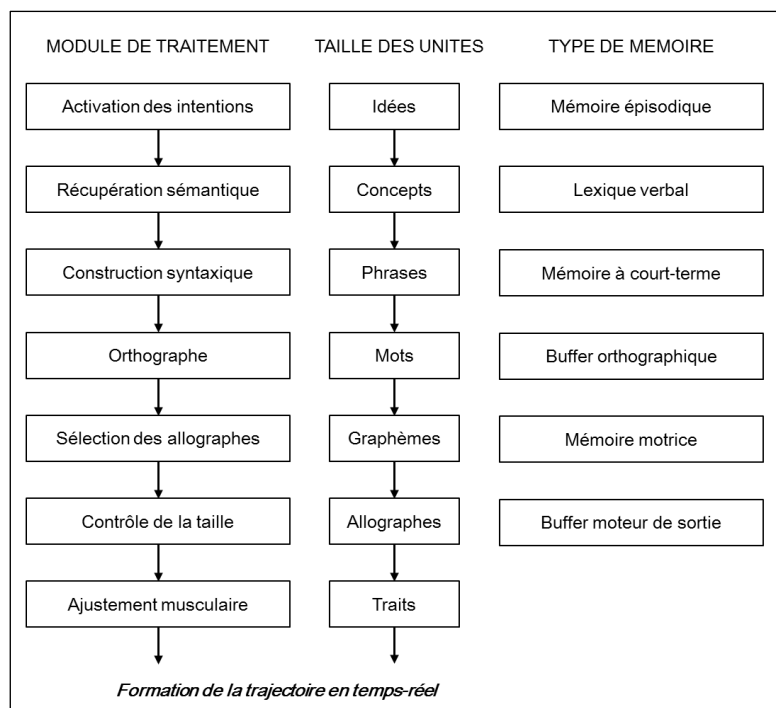


Figure I-5 : Modèle de la production de l'écriture manuscrite de Van Galen (1991). Architecture des modules de traitement, unités de traitement et des mémoires de médiation.

L'existence de programmes moteurs abstraits pour l'écriture est selon Thomassen et Van Galen (1992) révélée par le haut degré de ressemblance de la forme du tracé graphique d'un même individu lorsqu'il utilise différents membres pour écrire. Une fois le programme moteur sélectionné, la taille et la vitesse d'écriture seraient ensuite contrôlées dans une étape distincte. La dernière étape décrite dans le modèle, l'exécution motrice en tant que telle, représente « le recrutement des synergies des forces musculaires agonistes et antagonistes nécessaires à la réalisation de la trajectoire d'écriture, dans un contexte biophysique donné » (Van Galen, 1991).

Ces différentes étapes périphériques de la production écrite, dont l'analyse des performances de certains patients permet de soutenir l'existence, restent difficiles à étudier

expérimentalement isolément chez le sujet sain. C'est pourquoi nous aurons tendance à tendance à les englober au sein d'une même entité en incluant l'exécution motrice elle-même qui implique pourtant tout un ensemble de processus complexes (gestion de la trajectoire, de l'espace graphique, de la force appliquée, de la cinématique du geste etc.). L'analyse des processus de production graphomotrice de l'écriture fait en effet l'objet d'un champ de recherche particulier (i.e. la graphonomie ; e.g. Djiova & Plamondon, 2009; Plamondon & Djiova, 2006), s'appuyant sur des modèles computationnels, informatisés, pour décrire les propriétés de ce type de mouvement dirigés en conservant une certaine plausibilité neurobiologique. Dans le champ de la psychologie cognitive du langage, des modèles computationnels se développent également, et permettent de décrire avec une bonne précision certains phénomènes observés relatifs à l'accès orthographique en lecture et, dans une moindre mesure, en production écrite.

I.3. Modèles alternatifs l'accès orthographique

Plusieurs auteurs ont suggéré que les modèles modulaires utilisés fréquemment en neuropsychologie cognitive ne seraient pas les meilleures représentations de fonctions cérébrales (Seidenberg & McClelland, 1989). Des modèles computationnels alternatifs, connexionnistes, sous la forme de réseaux distribués de petites unités ont ainsi été développés. Les modèles connexionnistes comprennent des couches de petites unités indépendantes, aussi appelés « neurones formels », connectés entre eux, recevant chacun un signal d'entrée et fournissant un signal de sortie. Dans le domaine du langage, ils ont particulièrement été utilisés pour rendre compte des capacités de lecture et peuvent être utilisés pour modéliser le fonctionnement normal, l'apprentissage, ou les effets de lésions.

I.3.1. Un modèle computationnel à double-voie : le modèle DRC

Les modèles double-voie ont le plus souvent été développés pour modéliser l'accès orthographique à partir d'un mot lu. Comme nous l'avons vu, les processus centraux mis en œuvre lors de la production verbale écrite ne dépendent pas nécessairement de la nature de la sortie (e.g. écriture manuscrite, épellation orale) et l'architecture cognitive sous-tendue par les modèles de l'accès orthographique en lecture est bien souvent transposable à d'autres fonctions langagières. Le modèle DRC (pour *Dual-Route Cascaded* : modèle double voie à traitement en cascade) de Coltheart (Coltheart & Rastle, 1994; Coltheart, Rastle, Perry, Langdon, & Ziegler, 2001) est similaire aux modèles à double voie classiques mais présente certaines différences parmi lesquelles le fait que l'information circule en cascade. Ainsi les traitements effectués à un niveau peuvent débiter avant que les traitements du niveau précédents ne soient terminés. Ces

traitements sont en outre interactifs : chaque module inclut des connexions excitatrices et inhibitrices, bidirectionnelles, envers les modules adjacents (voir Figure I-6). Dans ce modèle, chaque module est en réalité conçu comme un assemblage d'unités discrètes, représentant les plus petits composants symboliques tels que les mots dans le lexique, ou les lettres.

Comme pour les modèles à double voie de l'écriture, une voie lexicale, passant par un lexique orthographique, et une voie sous-lexicale procédant par conversion des graphèmes identifiés en phonèmes, permettent d'aboutir à la sortie, qui est cette fois une représentation phonémique et articulatoire (Figure I-6). La reconnaissance visuelle des caractères est permise par un système en plusieurs couches, inspiré du modèle computationnel de McClelland et Rumelhart (1981) : une couche traitement des traits visuels, dont chaque unité va activer des unités de la couche suivante, les lettres contenant ces traits à la bonne position, qui vont ensuite activer les unités de la couche des mots contenant ces lettres à la bonne position. A chaque niveau, des connexions inhibitrices sont présentes, permettant par exemple aux unités « lettres » d'inhiber les unités mots contenant la lettre à une mauvaise position. L'activation va se propager dans le reste du système de manière analogue, les unités « phonème » allant activer les unités « mots » contenant ce phonème à la bonne position tout en inhibant les mots le contenant à une position différente. Ce modèle prévoit une propagation de l'activation de manière simultanée dans les deux voies, lexicale et sous-lexicale. La voie lexicale étant simplement plus directe et plus rapide. De la même manière que pour l'écriture, la voie lexicale sera prépondérante pour la lecture de mots connus ou réguliers alors que la voie « grapho-phonémique » sera essentiellement mobilisée lors de la lecture de mots inconnus ou de pseudo-mots.

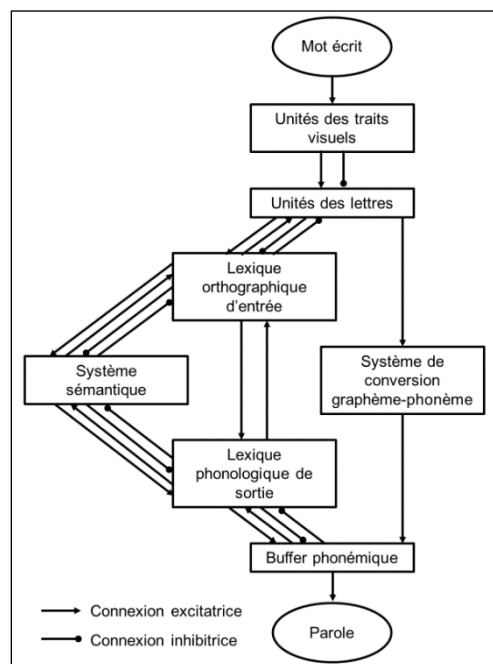


Figure I-6 : Modèle de la lecture double voie à traitement en cascade de (Coltheart et al., 2001).

Le modèle de Coltheart et al. (2001) peut être utilisé pour faire des prédictions quantitatives quant aux capacités à lire ou à orthographier des mots réguliers chez des sujets sains ou des patients en se basant sur leur capacité à orthographier des mots irréguliers et des pseudo-mots, sur le degré d'atteinte de l'une ou l'autre voie. Rapcsak, Henry, Teague, Carnahan, et Beeson (2007) sont ainsi parvenus à montrer qu'une telle équation issue du modèle DRC pouvait permettre de prédire avec une grande fiabilité les performances orthographiques de patients alexiques et agraphiques. Les résultats d'une analyse de régression multiple suggèrent de plus que les voies lexicale et sous-lexicale contribuent de manière indépendante à la lecture ou à l'écriture sous dictée.

Les modèles à double-voie utilisant des systèmes séparés pour lire ou écrire des mots irréguliers ou des pseudo-mots ont donc largement démontré leur capacité à décrire le comportement normal et pathologique mais plusieurs questions restent à élucider, comme le rôle joué par le système sémantique dans l'accès orthographique. Certaines approches non modulaires, beaucoup plus interactives, ont été développées.

I.3.2. Modèles connexionnistes

Les modèles connexionnistes se basent le principe d'un réseau de représentations distribuées, présentant des connexions distribuées et interactives, plutôt qu'une architecture composée de modules indépendants. Le modèle PDP (pour *Parallel Distributed Processing*) de Seidenberg et McClelland (1989) est le modèle connexionniste le plus largement accepté. Il a été là encore surtout développé pour être appliqué à la lecture. Il propose une totale interconnexion des représentations orthographiques ou de la forme visuelle des mots, des représentations phonologiques et des représentations sémantiques (voir figure I-7 ; Harm & Seidenberg, 2001; Harm & Seidenberg, 2004). Dans ce modèle, les mots ne sont pas représentés comme des nœuds uniques dans le réseau mais plutôt comme des schémas d'activation distribués au travers de plusieurs unités. Les trois couches d'unités (orthographique, phonologique et sémantique) sont connectées entre elles par le biais d'unités cachées servant à extraire ces schémas d'activité de plus haut niveau. Le modèle est « entraîné » en lui proposant un corpus de mots dont il extrait les régularités statistiques. Il peut ainsi être utilisé pour simuler et prédire la performance de lecteurs sains ou cérébro-lésés sans passer par l'utilisation d'un jeu de règles explicites préétablies (Plaut, McClelland, Seidenberg, & Patterson, 1996).

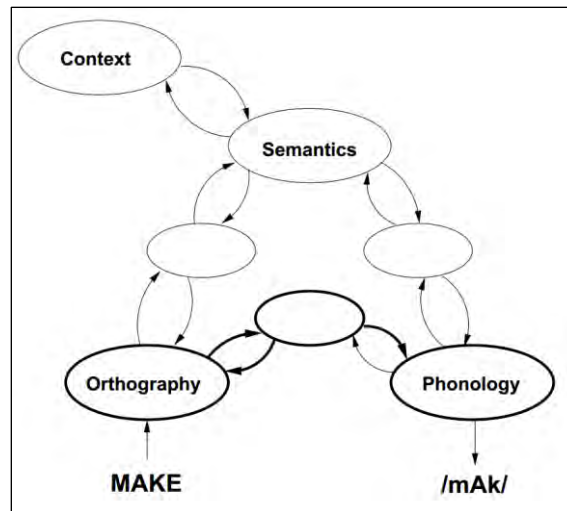


Figure I-7 : Modèle « en triangle » de Seidenberg et McClelland (1989), implémenté par (Harm & Seidenberg, 2001, 2004) pour examiner les liens entre codes phonologiques et codes orthographiques.

Des modèles de ce type ont aussi été conçus pour étudier la production orthographique à partir d'entrées différentes. Ainsi le modèle NETspell de Olson et Caramazza (1994) permet de générer des séquences de lettres à partir de séquences de sons. Il est composé d'une couche « phonologique » qui reçoit les entrées auditives, d'une couche intermédiaire cachée, et d'une couche « orthographique » de sortie. Chaque unité de chaque couche est interconnectée avec toutes les unités de la couche adjacente. Là encore, le système, qui ne contient ni règles de correspondance phonème-graphème, ni lexicale, peut subir une phase d'apprentissage dans laquelle on lui présente des mots (i.e. signal d'erreur rétroactif, renforcement des connexions lorsque la prédiction est correcte) pour devenir par exemple capable d'« apprendre » des formes orthographiques irrégulières. Certaines erreurs persistent parfois sur des mots irréguliers mais restent phonologiquement plausibles. En provoquant des « lésions » dans ce type de réseau, on peut générer un comportement semblable à celui de la dysgraphie de surface (incapacité à orthographier des mots irréguliers mais préservation des réguliers) (Brown & Loosemore, 1994; Olson & Caramazza, 1994).

Cependant, Houghton et Zorzi (2003) soutiennent que ces modèles ne permettent pas encore d'expliquer l'ensemble des données observées. Ils proposent un modèle hybride, connexionniste, à double voie, dans lequel les couches orthographiques et phonologiques sont connectées par deux voies distinctes : une voie directe et une voie indirecte contenant une couche intermédiaire d'unités cachées. Ce modèle est capable de reproduire le comportement de production orthographique d'individus normaux et de patients souffrant d'agraphie lexicale. Il prédit que la voie lexicale directe domine généralement la sélection de la représentation orthographique mais qu'une lésion partielle de celle-ci peut conduire à la production de

réponses qui semblent « mélanger » le produit des deux voies. Il est ainsi aussi capable de rendre compte des erreurs de patients comme LAT décrit par Rapp et al. (2002).

La validation et l'élaboration de ce type de modèle comme de tous les modèles de la production écrite précédemment décrits a nécessité de résoudre un certain nombre d'interrogations et suscité un certain nombre de débats. Au-delà des apports considérables de la neuropsychologie cognitive, étudiant dans le détail les déficits de patients cérébro-lésés, agraphiques ou alexiques, les travaux de psycholinguistique s'intéressant au comportement normal peuvent tout autant nous renseigner sur les mécanismes cognitifs mis en jeu dans la production verbale écrite.

II. L'ETUDE DE LA PRODUCTION ECRITE DE MOTS EN PSYCHOLINGUISTIQUE : QUESTIONS LATENTES

Des paradigmes très simples comme l'écriture de mots sous dictée, la dénomination écrite d'images, ou plus complexes comme le paradigme d'interférence image-mot, dans lesquels on recueille des temps de réaction ou d'autres variables comportementales, peuvent être utilisés pour tester les prédictions ou répondre à des questions qui découlent des modèles et ainsi les faire évoluer. Plusieurs de ces questions font l'objet de débats et de recherches en psycholinguistique et il est nécessaire de les évoquer ici car l'interprétation des données qui seront présentées dans les parties expérimentales de ce travail, utilisant des tâches de production écrite de mots isolés, s'appuie bien souvent sur les hypothèses théoriques qui en sont issues (e.g. déterminants des latences en production écrite). Une attention particulière sera portée sur deux points particuliers car ils feront l'objet d'une importante partie de nos travaux (la question de l'architecture fonctionnelle des modèles et l'impact de la régularité orthographique en production écrite).

II.1. La question de l'autonomie orthographique en dénomination

II.1.1. La tâche de dénomination écrite d'images

Les modèles que nous avons décrits jusqu'à présent permettaient en grande partie de décrire les processus à l'œuvre dans la production verbale écrite de mots sur entrée auditive (e.g. Rapp et al., 2002), dans lesquels la récupération de la représentation orthographique était

nécessairement précédée d'une étape phonologique (utilisée pour activer une entrée dans le lexique orthographique ou transcrite par la procédure de conversion). L'utilisation de tâches sur entrée visuelle comme la tâche de dénomination écrite d'images permet pourtant de questionner la nécessité d'une telle implication de la représentation phonologique lors de l'écriture usuelle.

La tâche de dénomination d'images, à l'oral ou à l'écrit, est une tâche simple, classiquement utilisée en psycholinguistique pour étudier l'influence de certaines variables sur le comportement. La vitesse de dénomination, ou le temps de réaction, est utilisé pour déterminer à quel niveau de traitement l'effet de ces variables survient. De la même manière que dans les modèles de production écrite sous dictée évoqués plus haut, cette tâche fait intervenir plusieurs étapes. Lorsqu'une image est présentée, elle est d'abord traitée visuellement, via l'extraction des traits visuels, des couleurs, etc. L'objet est ainsi identifié grâce à l'activation de codes structuraux (Humphreys, Lamote, & Lloydjones, 1995). Ce niveau « structural » va permettre d'accéder ensuite à la représentation sémantique de l'objet stockée en mémoire à long terme (i.e. ses propriétés ou ses caractéristiques fonctionnelles) (Bonin, 2002; Ferrand, 1997). Une telle distinction entre un niveau structural et un niveau sémantique s'appuie sur les descriptions de patients présentant une agnosie visuelle. Ces patients ne sont pas capables d'identifier les objets pour ce qu'ils sont mais peuvent être capables de les nommer si on les leur décrit (e.g. Humphreys & Riddoch, 1987). Il est ensuite admis que la récupération du nom de l'objet (e.g. sa représentation phonologique) survient dans un troisième temps, passant nécessairement par l'activation de la représentation sémantique. Un déficit à ce niveau-là se traduit par une anomie (Ellis, Kay, & Franklin, 1992).

II.1.2. La médiation phonologique obligatoire et l'autonomie orthographique

Dans la production écrite en général et en dénomination écrite en particulier, on a longtemps considéré que le passage par la représentation phonologique était obligatoire pour accéder au code orthographique (Geschwind, 1969; Luria, 1970). L'écriture passerait nécessairement par l'accès à une représentation mentale « sonore » du mot à écrire. En témoignent par exemple la production par erreur d'homophones (i.e. substituer un mot tel que « saut », par son homophone « seau »), ou d'erreurs orthographiques phonologiquement plausibles (« monsieur » devient « meussieu »). De plus, les patients présentant une nette dissociation entre capacités de production verbale à l'oral et à l'écrit restent rares. Cette hypothèse dite de la « médiation phonologique obligatoire » a pourtant été remise en question

par certaines études neuropsychologiques (e.g. Cuetos & Labos, 2001; Miceli, Benvegna, Capasso, & Caramazza, 1997; Rapp, Benzing, & Caramazza, 1997). Le patient présenté par Rapp et al. (1997) était par exemple souvent incapable de dénommer un objet à l'oral alors qu'il était tout à fait capable de donner son nom à l'écrit. Le patient décrit par Miceli et al. (1997) produisait une réponse incorrecte différente en modalité orale et écrite : face à une image présentant des poivrons, il écrivait « tomates » et disait « artichaut ». Ce qui est incompatible avec la conception de la récupération d'une même représentation phonologique pour les deux modalités. Ces données ont donc conduit à *l'hypothèse de l'autonomie orthographique*, postulant que les formes orthographiques puissent être récupérées directement via le système sémantique et sans passer par la phonologie.

Bonin, Fayol, et Gombert (1997) ont mis à l'épreuve cette hypothèse chez le sujet sain en utilisant une tâche d'interférence image-mot, dans laquelle les sujets devaient dénommer une image alors qu'un mot distracteur, phonologiquement relié ou non, était simultanément présenté auditivement. Les résultats ont montré que les participants étaient plus rapides pour dénommer en présence d'un distracteur phonologiquement relié, mais uniquement lorsque cette réponse était fournie à l'oral ; aucun effet n'était présent à l'écrit. Cela a été interprété comme un argument en faveur de l'autonomie orthographique, l'absence de l'effet facilitateur du distracteur phonologique à l'écrit suggérant que la phonologie n'est pas intervenue dans le processus.

Toutefois plusieurs auteurs posent l'hypothèse que si la phonologie n'était pas obligatoire pour recouvrir les formes orthographiques, elle jouerait un rôle contraignant dans leur sélection. Miceli, Capasso, et Caramazza (1999) ont ainsi décrit le cas d'un patient, présentant un déficit du système sémantique et de la procédure de conversion phonème-graphème. Ce patient fournissait une réponse lexicalement incorrecte à l'oral lorsqu'il devait dénommer une image oralement puis à l'écrit, mais pas lorsqu'il devait la dénommer à l'écrit puis oralement. Dans ce dernier cas, cela suggère que la conversion phonème-graphème, intacte, a permis à la représentation orthographique de contraindre la sélection de la bonne représentation phonologique. En outre, comme nous le verrons plus loin, un impact de l'irrégularité phono-orthographique sur la production écrite a bel et bien été mis en évidence en dénomination écrite, comme en écriture sous dictée, chez le sujet sain (voir Bonin, Collay, & Fayol, 2008). Ce qui suggère fortement l'influence de la phonologie, bar le biais de la voie de conversion phonème-graphème, sur l'encodage orthographique en production verbale écrite.

II.2. Les déterminants des latences en production écrite de mots

Les latences, ou temps de réactions, sont largement utilisés en psycholinguistique à l'oral, grâce aux systèmes d'enregistrement acoustique avec « clé vocale », et plus récemment à l'écrit, grâce à l'apparition des tablettes graphiques. Bonin et Méot (2002) ont ainsi cherché à identifier les différentes variables linguistiques ou caractéristiques des mots déterminant les latences en production écrite sous dictée. 164 mots étaient présentés et les latences d'écriture collectées. Au-delà de la durée acoustique du stimulus et de la longueur des mots, une analyse de régression a révélé que l'âge d'acquisition et la consistance (ou régularité orthographique) étaient les principaux prédicteurs des latences. La fréquence lexicale et la valeur d'imagerie (i.e. degré de facilité avec lequel des mots évoquent une image mentale) interagissaient aussi avec la consistance. L'effet du nombre de voisins phonologiques des mots n'était pas significatif et celui du nombre de voisins orthographiques n'était pas rapporté.

II.2.1. Les effets de voisinage

Nous l'avons vu, le modèle à double voie de Rapp et al. (2002) proposait une intégration du produit des voies à un niveau graphémique. Les deux voies seraient simultanément recrutées et utilisées pour sélectionner les bons « candidats » parmi un ensemble d'unités graphémiques. Folk, Rapp, et Goldrick (2002) avancent ainsi que cette intégration aurait pour fonction de renforcer la cible dans une compétition comprenant plusieurs « mots voisins » activés. On qualifie de voisins orthographiques les mots partageant une majorité de lettres identiques et de voisins phonologiques les mots partageant une majorité de phonèmes identiques. La patiente que Folk, Rapp, et Goldrick (2002) décrivent, atteinte au niveau lexical et sous-lexical, commettait en effet des erreurs de substitution lexicale, produisant des mots phonologiquement ou orthographiquement proches du mot cible, suggérant une mauvaise résolution de la compétition entre les différents voisins. Les auteurs ont proposé à cette patiente une tâche d'écriture sous dictée lors de laquelle celle-ci devait répéter oralement « ba, ba, ba » pendant sa production. Cette procédure dite de « suppression articulatoire » a pour but de gêner le déroulement de la procédure de conversion sous-lexicale. Les résultats ont montré que cette condition avait pour effet une réduction des erreurs phonologiquement plausibles, de l'effet de régularité (la voie phonologique semble donc bien moins influente), et une augmentation des erreurs de substitution lexicale : les « voisins » sont plus souvent sélectionnés.

L'influence du nombre de voisins orthographiques et phonologiques sur la reconnaissance des mots en lecture, en dénomination ou dans des tâches de décision lexicale est

bien documentée (voir par exemple Andrews, 1997; Yates, 2005), mais les résultats sont contradictoires. Des effets tantôt facilitateurs, tantôt inhibiteurs d'un grand nombre de voisins ont été rapportés. Les données obtenues en production écrite ou orthographique chez le sujet sain sont par contre quasiment inexistantes. Bonin et Méot (2002) n'ont pas observé d'impact significatif du nombre de voisins phonologiques sur les latences en production écrite sous dictée, bien que la reconnaissance auditive des mots ayant beaucoup de voisins soit généralement considérée comme plus longue (e.g. Ziegler & Muneaux, 2007). Roux et Bonin (2009) ont eux utilisés une tâche d'épellation orale sous dictée (de mots monosyllabiques) pour étudier l'effet du nombre de voisins orthographiques. Ils ont montré un effet facilitateur sur les latences pour les mots présentant un nombre important de voisins, alors qu'une analyse de régression ne révèle aucun effet du nombre de voisins phonologiques. Cela est interprété en faveur de l'hypothèse d'une connexion bidirectionnelle entre la représentation lexicale orthographique et les graphèmes individuels. Ainsi les graphèmes activés activent en retour les représentations lexicales des mots voisins, qui vont elles-mêmes entraîner une nouvelle activation des graphèmes qui les constituent (partiellement communs avec la cible). Cette interactivité amplifiant la contribution de la voie lexicale. Un effet facilitateur d'un grand nombre de voisins orthographiques s'opposerait donc à un effet inhibiteur, ou une absence d'effet, d'un grand nombre de voisins phonologiques. Bien qu'une telle dichotomie n'ait, à notre connaissance, pas été mise aussi clairement en évidence en production écrite de mots, ceci souligne l'importance de contrôler ces différentes variables lorsque l'on s'intéresse aux déterminants des latences dans une telle tâche.

II.2.2. Les effets de fréquence et d'âge d'acquisition

La fréquence lexicale des mots est une mesure statistique qui renvoie au nombre d'occurrence du mot dans l'ensemble de la langue ou, à défaut, au sein d'un corpus donné. Il existe plusieurs bases de données en français nous fournissant cette mesure (e.g. BRULEX ; Content, Mousty, & Radeau, 1990; LEXIQUE ; New, Pallier, Ferrand, & Matos, 2001). La fréquence est souvent considérée comme la base de l'organisation des mots dans le lexique orthographique ; les mots les plus fréquemment rencontrés étant reconnus plus rapidement en lecture que les mots rares. En dénomination d'images à l'oral, l'effet de fréquence a régulièrement été mis en évidence depuis sa première démonstration par Oldfield et Wingfield (1965) ; le délai pour dénommer une image est plus long si le nom de l'image est rare. Selon Jescheniak et Levelt (1994) cet effet émerge au niveau de l'accès lexical orthographique, non pas au niveau de la reconnaissance de l'image, ni au niveau de la préparation phonétique articulatoire ou au niveau de l'accès à la représentation phonologique.

Bien qu'il existe peu de travaux étudiant les effets de fréquence en production écrite, de tels effets apparaissent aussi dans cette modalité, que ce soit en dénomination d'images ou en production sous dictée (Bonin, Fayol, & Gombert, 1998). Cet effet se situerait à nouveau à un niveau lexical. Selon la conception double-voie, en présence d'un mot fréquent, la voie lexicale permettra de récupérer la représentation orthographique de manière très rapide. Au contraire, si le mot est rare la récupération dans le lexique orthographique sera plus lente et le résultat de la voie phonologique surviendra simultanément. On observe ainsi un « coût » de la présence d'une irrégularité orthographique (la voie phonologique fournissant par conversion du phonème une graphie « régulière ») plus important sur les mots rares (Bonin & Méot, 2002; Kreiner, 1996).

Pourtant selon Bonin (Bonin, 2005; Bonin, Chalard, Méot, & Fayol, 2002), ces effets de fréquence lexicale observés en dénomination écrite pourraient être confondus avec l'effet de l'âge d'acquisition des mots (ou AoA pour *Age of Acquisition*) (un débat similaire existe aussi en production orale ; Morrison, Ellis, & Quinlan, 1992). L'AoA désigne l'âge auquel nous acquérons un mot au cours de l'apprentissage. On le mesure le plus souvent de manière subjective, en demandant à des groupes d'adultes de l'évaluer sur une échelle comprenant différentes tranches d'âge (la comparaison avec l'âge d'acquisition réel observé chez des enfants montre que cette méthode s'avère plutôt fiable et valide ; e.g. De Moor, Ghyselinck, & Brysbaert, 2000), mais des méthodes plus objectives recueillant des données auprès d'enfants d'âges différents via des tests de vocabulaire ou des tâches de dénomination sont parfois utilisées (e.g. Morrison, Chappell, & Ellis, 1997). Bien que l'AoA et la fréquence lexicale soient corrélées (les mots fréquents sont souvent appris plus tôt), Bonin, Fayol, et Chalard (2001a) ont mis en évidence au travers de tâches de dénomination d'images à l'oral et à l'écrit que l'âge d'acquisition avait un impact sur les latences même lorsque la fréquence lexicale était contrôlée. En revanche, la fréquence lexicale n'avait, elle, pas d'effet lorsque l'AoA était contrôlé (quoique que d'autres facteurs, d'ordre méthodologique, puissent expliquer ce dernier résultat). Plutôt que deux effets indépendants, certains auteurs proposent que l'AoA et la fréquence interagissent, un effet de fréquence étant parfois obtenu uniquement sur des mots acquis tardivement (Barry, Morrison, & Ellis, 1997).

Zevin et Seidenberg (2002), en utilisant une approche connexionniste, ont cherché à dépasser les limites de l'AoA et de la fréquence lexicale, par les concepts de *fréquence cumulée* et de *trajectoire fréquentielle*. La fréquence cumulée d'un mot correspond au nombre de fois qu'on l'a rencontré depuis l'enfance. Pas seulement l'usage « actuel », à l'âge adulte, que mesure la fréquence lexicale. La trajectoire fréquentielle tient compte de l'expérience que l'on a pu avoir avec un mot : certains mots très fréquents pendant l'enfance ne le sont plus du tout à l'âge

adulte. Les mesures d'AoA chez l'adulte utilisées dans beaucoup d'études résulteraient donc en réalité d'effets de la trajectoire fréquentielle des mots. Pourtant, même si elle permet une opérationnalisation « objective » de l'AoA, les prédictions issues de cette conception n'ont pas été validées, l'effet d'AoA ne semble par exemple pas influencé par l'âge des sujets (i.e. par la durée de stockage en mémoire).

L'interprétation des effets d'AoA est toujours très discutée. Aucun effet n'étant présent dans une tâche de catégorisation sémantique, ou lorsque la production est différée (Barry, Hirsh, Johnston, & Williams, 2001; Morrison et al., 1992), ils relèveraient à l'oral du niveau lexico-phonologique (récupération de la représentation phonologique du mot). On ne peut pourtant pas en déduire une localisation lexico-orthographique de ces effets à l'écrit, puisque c'est bien un AoA « oral » (âge d'acquisition de la forme orale du mot) qui influence les latences de dénomination, et pas un AoA « écrit » (âge d'acquisition de la forme écrite du mot) (Bonin et al., 2002). De plus, une interprétation strictement phonologique des effets d'AoA à l'oral prédirait un effet de la trajectoire fréquentielle lors de la lecture à haute voix, ce qui n'est pas le cas. L'effet surviendrait dans des tâches où des liens arbitraires entre codes sont mobilisés (Bonin, 2005). Plusieurs auteurs proposent ainsi aujourd'hui l'hypothèse que les effets d'AoA et de fréquence lexicale en dénomination sont en réalité localisés dans les connexions entre les représentations sémantiques et les représentations lexicales (Bonin, 2005; Ellis & Lambon Ralph, 2000).

II.2.3. Régularité et consistance orthographique

Le système orthographique du français, tout comme celui de l'anglais, est souvent considéré comme particulièrement opaque. Cela signifie que de nombreuses correspondances différentes, régies par des règles complexes, existent entre les unités sonores et les unités orthographiques. D'autres langues comme l'espagnol ou l'italien possèdent au contraire des systèmes orthographiques moins ambigus, plus transparents (Jaffré & Fayol, 1997). Il faut de plus faire une distinction entre les correspondances grapho-phonémiques, de l'écrit vers l'oral et les correspondances phono-graphémiques, de l'oral vers l'écrit. Le français est en effet caractérisé par une forte proportion de mots dont il est difficile de déduire l'orthographe à partir de leur prononciation orale (Ziegler, Jacobs, & Stone, 1996). Le phonème /o/ peut par exemple s'orthographier {o}, {eau}, {au}, ou encore {ot}, le phonème /ã/ s'orthographier {an} ou {en},

etc¹. La caractérisation de liens entre phonologie et orthographe a fait l'objet de nombreux travaux, en particulier dans le but de comprendre les mécanismes permettant à l'enfant d'apprendre l'orthographe de la langue (voir Pacton, 2008). Elle est aussi particulièrement importante dans le cadre des modèles de la production écrite chez l'adulte puisque la procédure de conversion phonème-graphème, justement basée sur les relations « les plus fréquentes dans la langue », jouerait toujours un rôle dans l'accès à la représentation orthographique.

Les chercheurs ont donc souvent cherché à évaluer le degré prédictibilité de l'orthographe d'un mot, qui renvoie selon les chercheurs aux notions de « régularité » ou de « consistance », souvent utilisés comme synonymes. On a ainsi tendance à qualifier de régulier un mot dont toutes les correspondances graphème-phonème (i.e. en lecture) ou phonème-graphème (i.e. en écriture) sont les plus fréquentes (le mot peut théoriquement être écrit sans jamais avoir été rencontré auparavant), et d'irrégulier un mot qui comprendrait une violation des règles de correspondance (e.g. phonème /o/ dans « oignon »). De la même manière une unité phonologique (e.g. la rime d'une syllabe) dont l'orthographe est différente selon les mots est qualifiée d'inconsistante, par opposition à une unité consistante. Ici, nous préférons nous référer à la notion de consistance en tant que mode de calcul du « degré de consistance » (ou de régularité), tel qu'il a été calculé par des auteurs comme Peereman et Content (1999). En effet, de notions dichotomiques, la consistance et la régularité sont devenues des variables continues que l'on peut d'une certaine manière mesurer.

Jared, McRae, et Seidenberg (1990) font par exemple appel à la notion de mots « amis » ou « ennemis » en lecture. Pour une même unité orthographique (e.g. {ille} dans *fil*le), les mots lui associant une même prononciation sont qualifiés d'amis (e.g. /ij/ dans *bil*le, *gril*le) quand les mots lui associant une prononciation différente sont qualifiés d'ennemis (e.g. /il/ dans *vil*le). Ces auteurs montrent que c'est la fréquence relative de ces amis et ennemis (et pas leur nombre) qui va déterminer les effets de consistance graphophonologique ; les latences en lecture à l'oral étant par exemple plus longues pour les mots dont la somme des fréquences des ennemis est élevée.

Dans le cadre d'un programme de recherches sur les troubles du langage écrit, Lecours (1996) a proposé une analyse du français écrit qui permet de classer les mots du français sur un continuum d'irrégularité. Du plus complexe au plus simple, ce continuum comprend les mots qui comportent une séquence sublexicale (initiale, interne ou finale) homographe hétérophone (i.e.

¹ Par convention, nous désignerons les phonèmes entre des barres obliques / / et les graphèmes ou la forme graphémique des mots entre des accolades { }.

différentes prononciations pour un même graphème), (e.g. *chocolat* et *choléra*), les mots qui comportent une séquence sublexicale homophone hétérographe (i.e. différents graphèmes pour une même prononciation ; e.g. *bateau*, *badaud*, *falot*, etc.) et les mots les plus réguliers, dont le nombre de phonèmes équivaut au nombre de lettres (e.g. *alinéa*). Le degré d'irrégularité est calculé en fonction de la somme de la fréquence lexicale des mots, eux-mêmes sélectionnés en fonction de la position de la séquence sublexicale étudiée. Par exemple, parmi les mots comportant une séquence sublexicale homographe hétérophone (e.g. {ch} à l'initiale), ceux dont la somme des fréquences pour une même phonie est la plus importante sont qualifiés de préséants (e.g. /ʃ/ dans *chocolat*) par rapport à ceux pour lesquels la somme de fréquences est plus faible, qualifiés d'irréguliers (e.g. /k/ dans *choléra*). Cette analyse de l'irrégularité du français a été validée expérimentalement dans le cadre de l'apprentissage du français écrit. Soum et Nespoulous (1999) ont montré qu'en période d'apprentissage, les enfants commettent respectivement plus d'erreurs orthographiques sur les mots irréguliers, puis préséants, puis réguliers. Par ailleurs Soum (1997) s'inspirant de cette analyse pour étudier les erreurs orthographiques effectuées dans le cadre du développement du langage écrit a exploré les liens entre l'orthographe et la phonologie et a montré que, pour une séquence sublexicale donnée dans une position donnée, le calcul de l'irrégularité était susceptible de varier en fonction de paramètres phonologiques comme la longueur du mot et la structure syllabique du mot. Pour les homophones hétérographes en {-o} par exemple, si le calcul de l'irrégularité est effectué sur l'ensemble des mots de la langue, la préséance correspond à la graphie {-eau} ; mais cette préséance diffère si l'on considère uniquement les mots de trois syllabes de type CV (e.g. *matelot*). Elle varie encore pour les mots de deux syllabes qui présentent la structure syllabique CCV.CV (e.g. *métro*).

La consistance a été développée comme une méthode de calcul analogue, permettant de mesurer la stabilité de la relation entre une unité phonémique et une unité orthographique (dans le sens de l'écriture) ou entre une unité orthographique et une unité phonémique (dans le sens de la lecture) (Bonin et al., 2008; Peereman & Content, 1999). Cette mesure, dans le cas de la consistance phono-orthographique (du phonème vers le graphème), est basée sur le nombre d'occurrences dans la langue, pour un phonème donné, de chacune des différentes formes orthographiques correspondantes. Ainsi, à la forme orthographique la plus répandue sera attribuée une valeur de consistance élevée (proche de 1, la valeur de consistance étant proportionnée à la quantité totale de formes orthographiques possibles) et à la plus rare (souvent désignée comme forme irrégulière) une valeur faible (proche de 0). Afin de ne pas prendre seulement en compte la quantité de mots mais de prendre aussi en compte leur fréquence d'usage, deux types de mesures de consistance sont distinguées ; la consistance-type, proportionnée par le nombre de mots présentant le couple phonème-graphème considéré, et la

consistance-token proportionnée par la fréquence lexicale de ces mots. L'impact négatif d'une valeur de consistance faible en production verbale écrite chez l'adulte a été mis en évidence à plusieurs reprises et au travers de différents types de tâches (e.g. écriture sous dictée, dénomination écrite) : tant au travers d'un allongement des délais d'initialisation de la réponse (i.e. des latences) que par une augmentation du taux d'erreurs orthographiques (Bonin & Méot, 2002; Bonin, Peereman, & Fayol, 2001b; Delattre, Bonin, & Barry, 2006; Peereman, 1997; Perry & Ziegler, 2004).

Ainsi ces effets de consistance chez le sujet sain, démontrant une influence « conflictuelle » de la phonologie, s'opposent à la conception de l'autonomie orthographique que nous avons évoqué plus haut, selon laquelle la représentation orthographique serait directement récupérée via le système sémantique sans le recours à la phonologie (quoique l'effet de consistance soit plus clair en écriture sous dictée qu'en dénomination écrite, voir Bonin et al., 2001b). En présence d'un phonème à orthographier, le mécanisme de conversion de la voie phonème-graphème sélectionnera généralement la graphie ayant la plus forte probabilité d'apparition (Barry & Seymour, 1988; Goodman-Schulman & Caramazza, 1987; Houghton & Zorzi, 2003; Rapp et al., 2002). Une telle probabilité étant très faible dans un mot inconsistant, il survient un « conflit » avec le produit de la récupération orthographique de la voie lexicale, pouvant fréquemment aboutir à une erreur orthographique phonologiquement plausible (Bonin et al., 2001b; Folk et al., 2002), bien que l'explication de telles erreurs reste discutée (erreurs de performance liées à la voie sous-lexicale ou stockage erroné dans le lexique ; voir notamment Bonin et al., 2008). La mesure de consistance semble avoir néanmoins démontré une certaine efficacité à prédire le comportement et peut être utilisée pour tester certaines hypothèses chez le sujet sain. L'augmentation des latences en écriture sous dictée pour les mots inconsistants a ainsi été observée quelles qu'aient été les manipulations méthodologiques visant à diminuer ou renforcer l'influence de la voie lexicale ou de la voie phonologique (Bonin, Collay, Fayol, & Méot, 2005). Ce qui suggère une intervention systématique des deux voies, sans contrôle stratégique possible à ce niveau. D'autres auteurs utilisent aussi la consistance pour interroger l'organisation temporelle des différents niveaux de traitements lors de la production écrite, et ainsi alimenter un débat sur l'architecture fonctionnelle des modèles (e.g. Delattre et al., 2006).

II.3. La question de la transmission de l'information entre les différents niveaux dans les modèles de production du langage

II.3.1. Conception sérielle ou en cascade en production verbale orale

On l'a vu, les modèles de production verbale de mots, essentiellement issus de la recherche utilisant le langage oral, s'accordent pour définir différents niveaux de traitement, se traduisant par une activation successive de différentes représentations (Ferrand, 2002). Dans le modèle de production de la parole de Levelt, Roelofs, et Meyer (1999), on distinguera par exemple les niveaux de « préparation conceptuelle », de sélection lexicale, ou encore d'encodage phonologique, avant d'aboutir à la phase d'articulation. Le décours temporel de cette transmission de l'activation d'un niveau de traitement à l'autre, et l'architecture fonctionnelle qu'elle sous-tend (i.e. quels sont les différents niveaux et comment les informations circulent d'un niveau à l'autre), a fait l'objet d'importants débats en psycholinguistique (pour une synthèse, voir Roux & Bonin, 2011). Ainsi, selon une conception strictement sérielle ou sérielle-discrète (e.g. Levelt et al., 1999; Levelt et al., 1991), le traitement effectué à un niveau donné ne démarre pas avant que celui du niveau précédent ne soit achevé. Cela implique par exemple en présence d'une image à dénommer, qu'une seule représentation phonologique est activée suite à la sélection de la représentation sémantique correcte ; les représentations sémantiques concurrentes n'atteignent pas le niveau suivant. Selon une conception en cascade au contraire (e.g. Caramazza, 1997; Humphreys, Riddoch, & Quinlan, 1988), la transmission de l'activation au niveau suivant peut se produire malgré le fait que niveau de traitement actuel ne soit pas achevé. Humphreys et al. (1988) ont en effet montré que des effets de fréquence lexicale, relevant donc du niveau lexical, pouvaient être influencés par la similarité perceptive entre les différents membres d'une catégorie (e.g. les animaux sont visuellement dissimilaires quand les fruits sont perceptivement similaires), similarité perceptive relevant du niveau « structural », en amont. Des travaux ultérieurs ont permis de renforcer les arguments en faveur de cette conception en cascade en montrant l'activation simultanée des représentations lexicale et phonologique en dénomination d'image (Morsella & Miozzo, 2002). D'autres modèles, interactifs, vont plus loin en proposant des connexions bidirectionnelles, où un niveau de représentation inférieur peut rétroagir sur le niveau supérieur (e.g. Cutting & Ferreira, 1999).

Ce débat sur la nature sérielle ou en cascade (voire interactive) de la transmission de l'activation entre deux modules principaux (i.e. récupération sémantique et récupération phonologique) a été étendu, toujours à l'oral, sur la relation entre de tels processus centraux (i.e. de préparation du message) et les processus périphériques (i.e. programmes moteurs

articulatoires). Ainsi, Damian (2003) a examiné les durées de production orale de mots dans une tâche d'interférence mot-image. Dans ce type de tâche, une image présentée à l'écran doit être dénommée pendant qu'un mot distracteur, présenté visuellement ou auditivement, doit être ignoré. La relation sémantique et/ou phonologique du distracteur et de la cible étant manipulée afin d'induire un conflit, qui se manifeste classiquement par une augmentation des temps de réaction. Les résultats de Damian (2003) ont montré que les durées d'articulation n'étaient pas influencées par la présence ou l'absence d'un tel conflit au niveau central, contrairement à l'hypothèse d'une répercussion en cascade sur les processus périphériques articulatoires. Les résultats obtenus par ces chercheurs (voir aussi Meyer, Roelofs, & Levelt, 2003) suggèrent donc que la réponse motrice (articulation vocale) n'est déclenchée qu'une fois toutes les étapes ayant mené à sa sélection ont été complétées.

II.3.2. Conception sérielle ou en cascade en production verbale écrite

Quelques travaux ont plus récemment visé à élargir ces questions, sur l'architecture fonctionnelle et la nature de la transmission de l'activation entre les différents niveaux, à la modalité écrite. Roux et Bonin (2012) ont utilisé un paradigme de dénomination écrite d'images superposées, dans lequel les participants devaient dénommer à l'écrit une image cible (e.g. dessin au trait de couleur verte) en ignorant une image distractrice (e.g. dessin au trait de couleur rouge, superposé par-dessus). Tout comme Morsella et Miozzo (2002) à l'oral, ils ont ainsi pu mettre en évidence un effet de facilitation sur les latences d'écriture lorsque les deux images étaient reliées (bien que l'effet de facilitation semble cette fois de nature orthographique, mais pas phonologique), argumentant en faveur d'une activation en cascade des différentes représentations « centrales », même en modalité écrite.

Comme précédemment en modalité orale, Damian et Stadthagen-Gonzalez (2009), ont cherché à savoir si de tels effets de facilitation au niveau des processus centraux se répercutaient, en cascade, sur les processus périphériques d'exécution de la réponse motrice. Leurs résultats ont montré au contraire que les effets de facilitation obtenus en dénomination écrite d'un mot-cible en présence d'un distracteur relié, étaient visibles sur les latences, mais pas sur les durées d'écriture. Les durées de production étant utilisées comme indicateurs du bon déroulement des processus périphériques. L'étape de « planification » de la réponse, qui s'étendrait jusqu'à au moins deux mots, serait entièrement achevée avant le déclenchement de la réponse, ce qui suggère une étape d'exécution motrice « encapsulée ».

Toutefois, tous les auteurs ne partagent pas cette conception. Delattre et al. (2006) ont mesuré les latences et les durées d'écriture dans une tâche de dictée de mots. Ils soutenaient que

si les étapes centrale et périphérique de la production écrite se succèdent de manière sérielle, la présence d'une ambiguïté dans le mot à produire (i.e. d'une irrégularité : association phonème-graphème de faible probabilité) affecterait uniquement les latences. Leurs résultats ont pourtant montré que l'écriture des mots irréguliers était non seulement initiée plus tardivement, mais aussi que les durées d'écriture de ces mots étaient plus longues (malgré un nombre de lettres et une fréquence de bigrammes équivalente). De plus, cet effet était plus important dans les premiers moments de chaque production : sur le premier mot écrit, chaque mot devant être écrit trois fois successivement. Les auteurs en ont par conséquent conclu que le traitement du conflit au niveau central continue d'affecter la production après le déclenchement de l'écriture, ce qui reflète un certain chevauchement des processus centraux et périphériques. Ceci est en accord avec le constat de Bonin et al. (2001b) qu'une séquence inconsistante n'affecte pas les latences dans une tâche de dénomination écrite lorsque celle-ci est située sur la partie finale du mot. La résolution de cette inconsistance finale se produit vraisemblablement après le début de la réponse et donc durant son exécution. Plus récemment Roux, McKeeff, Grosjacques, Afonso, et Kandel (2013) sont eux aussi parvenus, en mesurant la durée moyenne de traçage des traits composant chaque lettre (*strokes*), à montrer de tels effets « périphériques » d'un tel conflit « central » (lexical – sous-lexical) dans une tâche écrite de copie, puisque ces durées étaient affectées par la présence d'une irrégularité dans le mot. En manipulant la position de la séquence irrégulière dans le mot, début ou fin, ils ont de plus montré que les durées d'écriture du début du mot (première lettre) avaient tendance à être affectées lorsque l'irrégularité était au début, alors les durées d'écriture de toutes les lettres (ou des cinq premières lettres) étaient rallongées en cas d'irrégularité en fin de mot. Si l'essentiel des travaux utilisant des paradigmes d'interférence avec des conditions reliées ou non reliées, à l'oral et désormais à l'écrit, concluent généralement à une organisation fonctionnelle en cascade des différents niveaux de traitement centraux, le statut de la transition entre processus centraux et périphériques (i.e. de l'influence des premiers sur les seconds), en particulier dans l'écriture, reste discuté. Les approches de Delattre et al. (2006) ou de Roux et al. (2013) ont montré que l'utilisation de la notion de régularité orthographique ou de consistance pouvait être un bon moyen d'étudier cette question en utilisant un paradigme d'écriture sous dictée, plus écologique, plus proche des conditions d'écriture usuelles que le paradigme d'interférence.

Nous avons ainsi vu dans ce chapitre que les modèles cognitifs classiques de la production écrite du langage, souvent développés à partir de l'étude des déficits de patients agraphiques, distinguaient deux classes de processus cognitifs ; une succession d'étapes d'abord dédiés à la récupération de l'orthographe du mot, puis dédiés à la production graphomotrice.

Nous avons évoqué comment ces étapes pouvaient être impliquées dans des tâches d'écriture sous dictée ou de dénomination écrite et comment les recherches en psycholinguistique permettaient de répondre à plusieurs questions cruciales relatives à l'influence de la phonologie (par le biais de l'effet de régularité phono-orthographique par exemple), ou à la nature de la transmission de l'information entre les différents niveaux. Dans le chapitre suivant, notre intérêt se portera sur la question de l'anatomie fonctionnelle de la production écrite et nous chercherons à décrire comment, selon l'état actuel de nos connaissances, ces différents processus cognitifs sont implémentés au sein du cerveau.

CHAPITRE II : LES BASES CEREBRALES DU LANGAGE ECRIT

L'écriture est avant tout une compétence langagière, et avant d'en détailler ses bases cérébrales spécifiques, nous débuterons par évoquer les origines de l'étude des fonctions langagières en neuropsychologie cognitive, jusqu'au développement de l'utilisation de la neuroimagerie fonctionnelle pour étudier l'accès à la représentation orthographique (en lecture). Nous verrons ensuite comment la classification des différents types de troubles de l'écriture (i.e. agraphies) a permis de distinguer les différentes classes de processus cognitifs (centraux et périphériques) tout en permettant de proposer les premiers modèles de localisation anatomique des différentes fonctions impliquées. Nous tâcherons dans les sections suivantes de décrire les données les plus récentes obtenues grâce à la neuroimagerie et à des techniques de stimulation cérébrale.

I. INTRODUCTION : LANGAGE ET CERVEAU

I.1. De l'aphasiologie à la neuroimagerie fonctionnelle

La caractérisation de la neuroanatomie du langage a été l'objet d'un nombre considérable de travaux de recherche depuis la fin du XIX^{ème} siècle. A la suite de fameuse description par Paul Broca en 1861 d'un patient présentant des troubles du langage oral consécutifs à une lésion de l'hémisphère gauche, l'étude de patients aphasiques porteurs de lésions cérébrales (approche « anatomo-clinique ») s'est progressivement développée. Ces travaux ont conduit dans les années suivantes à un certain nombre de découvertes qui sont encore bien souvent d'actualité. Ainsi, le modèle classique de l'anatomie du langage développé à cette époque propose l'existence d'une aire frontale de l'hémisphère gauche dédiée à l'expression, la planification et l'exécution de la parole (l'aire de Broca; Broca, 1861) et une aire plus postérieure dédiée à la réception, l'analyse et l'identification des stimuli linguistiques (l'aire de Wernicke; Wernicke, 1874). Une déconnexion de ces deux aires, reliées anatomiquement par le faisceau arqué, conduirait à des symptômes aphasiques spécifiques, tels qu'une incapacité à répéter à l'oral un mot entendu (Lichtheim, 1885). Il sera montré que la reconnaissance visuelle des mots elle aussi peut être affectée de manière spécifique (i.e. sans trouble de la parole et de

l'écriture). Les lésions provoquant cette incapacité à lire, l'alexie, découleraient de lésions cérébrales localisées dans le gyrus angulaire gauche (Dejerine, 1891).

Depuis cette époque et encore de nos jours, de nombreux neurologues et neuropsychologues ont utilisé cette méthode consistant à étudier les relations entre la localisation d'une lésion, souvent découlant d'un accident vasculaire cérébral (ou AVC), et les symptômes ou déficits cognitifs qui en découlent. En effet, les AVC, qui surviennent lorsque l'apport sanguin dans une région du cerveau est interrompu par une occlusion d'une artère (accident ischémique) ou par la rupture d'un vaisseau sanguin (accident hémorragique), sont la forme la plus fréquente de lésion cérébrale chez les adultes. Ils peuvent survenir à n'importe quel endroit du cerveau et ainsi affecter les fonctions cognitives du patient de différentes manières. L'étude des compétences altérées ou préservées de ces patients offre ainsi l'opportunité aux chercheurs de faire progresser notre compréhension des relations entre comportement et structures cérébrales. Les classements des différents types d'aphasie découlant de ces travaux ont ainsi déjà permis d'en déduire une certaine cartographie anatomique du langage.

Les limites du modèle de l'aphasie pour la constitution des modèles théoriques du fonctionnement du système cognitif langagier sont pourtant nombreuses. Les aires du langage sont organisées en réseaux complexes et très interconnectés (Mesulam, 1990; Vigneau et al., 2006). Les déficits aphasiques ne résultent donc en général pas simplement d'une atteinte d'une aire corticale spécialisée pour un certain processus linguistique mais peuvent par exemple relever de l'atteinte de structures moins spécialisées qui lui sont connectées. Des lésions anatomiques situées à longue distance des aires spécialisées peuvent donc affecter les fonctions linguistiques (Blank, Scott, Murphy, Warburton, & Wise, 2002). Des phénomènes d'hypométabolisme à distance du site d'une lésion, le plus souvent réversibles, sont en effet observables au moyen de la neuroimagerie et connus sous le nom de diaschisis. Ainsi, les liens entre symptômes et lésions relèvent plus souvent d'un groupe d'aires que d'une aire circonscrite (Alexander, Hiltbrunner, & Fischer, 1989; Dronkers, Wilkins, Van Valin, Redfern, & Jaeger, 2004). L'évolution du patient peut aussi constituer une difficulté pour caractériser le réseau neuro-fonctionnel du langage sain. Les phénomènes de plasticité fonctionnelle et anatomique précoces et tardifs peuvent largement modifier l'organisation de ce réseau. L'implication de l'hémisphère droit dans le langage chez l'aphasique, mise en évidence par la neuroimagerie, et son rôle éventuel dans la récupération (Crosson et al., 2007) est un autre exemple de telles réorganisations fonctionnelles pouvant biaiser l'interprétation des liens symptôme-lésion. Le fait que les atteintes cérébro-vasculaires touchent plus fréquemment les sujets âgés représente

déjà une telle limite dans l'utilisation du modèle de l'aphasie pour décrire le fonctionnement normal.

Ce n'est donc qu'avec le développement dans les années 80 des techniques de neuroimagerie (TEP, IRMf, EEG ou encore MEG), qui permettent d'observer l'activité du cerveau engagé dans une tâche, que nos connaissances sur les substrats cérébraux des fonctions langagières chez le sujet sain ont subi un véritable essor. Une des premières expérimentations réalisée sur le sujet en TEP (tomographie à émission de positons) analysait par exemple les variations de débit sanguin cérébral lors de la perception passive de mots ou lors de leur prononciation orale (Petersen, Fox, Posner, Mintun, & Raichle, 1988). Ce type de travaux de neuroimagerie ont ainsi permis de mettre au jour la complexité et l'étendue des aires cérébrales impliquées (voir la Figure II-1 pour une localisation anatomique des principales régions corticales gauches impliquées dans les fonctions langagières). La quantité de travaux publiés, concernant le traitement auditif, la compréhension ou la production de la parole, la lecture, etc., a ainsi permis la conduction de plusieurs synthèses ou méta-analyses qui permettent de dresser un tableau assez complet de nos connaissances sur la neuroanatomie des fonctions langagières (Démonet, Thierry, & Cardebat, 2005; Hickok, 2009; Price, 2010; Price, 2012; Vigneau et al., 2006; Vigneau et al., 2011).

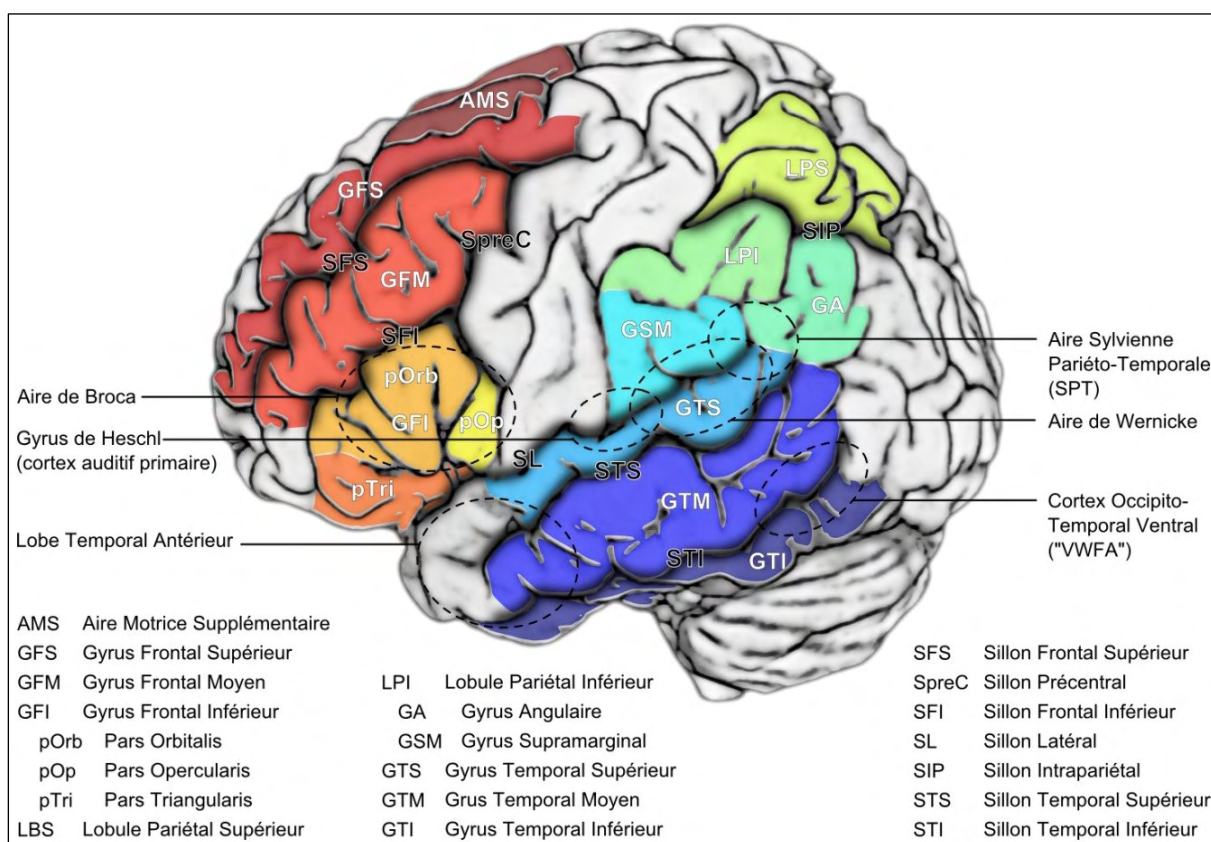


Figure II-1 : Localisation anatomiques des principales régions corticales de l'hémisphère gauche impliquées dans les fonctions du langage (Planton & Démonet, 2012).

Les fonctions langagières reposent donc principalement sur un ensemble de régions corticales de l'hémisphère gauche (bien que certains travaux mettent aujourd'hui en valeur les contributions du cervelet ; e.g. Murdoch, 2010; ou de l'hémisphère droit, voir Vigneau et al., 2011), avec, par exemple, le traitement de la parole au niveau du gyrus temporal supérieur et moyen ou le gyrus supramarginal, le traitement des mots lus dans le gyrus fusiforme, ou encore, la production orale dans le gyrus frontal inférieur. Pour une brève synthèse voir notre publication présentée en annexe (Planton & Démonet, 2012 ; Annexe 1).

I.2. Neuroimagerie de la lecture

Les fonctions linguistiques les plus spécifiques ont pu être étudiées (incluant la sémantique, la syntaxe ou la phonologie) au moyen de tâches diverses (production orale, dénomination d'images, lecture, décision lexicale, etc.) et en regard de cette profusion de travaux, la production écrite dont il sera question ci-après nous semble être longtemps restée relativement peu étudiée. L'écriture fait cependant appel à un ensemble de processus cognitifs dont certains sont à l'œuvre dans d'autres tâches linguistiques ; en particulier la lecture. Les modèles à double voie, évoqués précédemment pour décrire le processus d'écriture, la production du code écrit à partir de représentations abstraites (i.e. sémantique, phonologique, orthographique), s'appuient largement sur des modèles développés pour décrire et étudier la lecture : l'accès à ces représentations à partir d'un code écrit (modèles de Coltheart et al., 1993; Morton & Patterson, 1980; Patterson, 1986). La représentation phonologique d'un mot lu, à prononcer, peut en effet être récupérée via une voie lexicale ou directe (via le lexique orthographique) ou via une voie sous-lexicale indirecte ou phonologique procédant par conversion des graphèmes en phonèmes.

De nombreux chercheurs ont ainsi tenté d'identifier en neuroimagerie les bases cérébrales des différents processus de lecture, l'étude de cette compétence étant beaucoup plus facile d'accès que celle de l'écriture, qui implique un geste moteur et donc du mouvement (une absence totale de mouvement du sujet dans la machine est souvent nécessaire pour obtenir un signal de qualité). La question de l'existence d'une aire dédiée au traitement de la forme visuelle des mots a notamment fait l'objet de nombreux débats. Petersen, Fox, Snyder, et Raichle (1990) rapportent dès 1990 qu'une aire du cortex occipital, proche du gyrus lingual, serait active lors de la lecture de mots ou de pseudo-mots, mais pas lors de la lecture d'une chaîne de consonnes. Par la suite, une aire du gyrus fusiforme (aire de Brodmann 37), au niveau de la jonction occipito-temporale, activée 200 ms après la présentation visuelle d'un mot, a été identifiée via des tâches comportementales analogues et désignée par certains auteurs sous le nom de « Visual Word

Form Area » (VWFA) (Cohen et al., 2000; Dehaene, Le Clec'H, Poline, Le Bihan, & Cohen, 2002). Pourtant, sa réelle spécificité aux formes visuelles des mots a parfois été fortement contestée et est encore aujourd'hui discutée (Binder, Medler, Westbury, Liebenthal, & Buchanan, 2006; Price & Devlin, 2003; Vogel, Petersen, & Schlaggar, 2012).

La distinction entre les deux voies de la lecture s'appuie sur les profils de performances de certains patients, cérébro-lésés ou atteints de différentes formes de dyslexie, présentant des difficultés à lire certains types de mots (e.g. irréguliers) tout en ayant des capacités préservées pour d'autres types de mots (pseudo-mots). Il est ainsi relativement aisé de manipuler les stimuli dans une expérimentation en neuroimagerie pour tenter de dissocier les corrélats anatomo-fonctionnels de chacune des deux voies: mots vs. pseudo-mots, mots irréguliers vs. mots réguliers, voire lecture d'idéogrammes (Kanjis) vs. phonogrammes japonais (Kanas). Jobard, Crivello, et Tzourio-Mazoyer (2003) ont réalisé une méta-analyse portant sur 35 études ayant rapporté les résultats de telles comparaisons (leurs données incluaient aussi des données issues de tâches de décision lexicale, nécessitant l'accès au sens du mot, et de décision phonologique, nécessitant l'accès à la représentation phonologique). Ils rapportent n'avoir identifié aucune aire véritablement spécifique de la voie lexicale, du lexique orthographique. En revanche, les mécanismes de conversion phonème-graphème, particulièrement impliqués dans des tâches de lecture de pseudo-mots par exemple, reposeraient eux sur plusieurs aires : le gyrus supramarginal, le gyrus temporal supérieur et la pars opercularis du gyrus frontal inférieur. Ce travail a aussi confirmé l'existence de dissociations neurofonctionnelles entre les différents processus à l'œuvre dans les tâches de lecture. Au sein de la région frontale inférieure en particulier (aire de Broca), la pars opercularis serait concernée par les aspects phonologiques et les pars triangularis plutôt par les processus lexico-sémantiques.

La lecture est une compétence langagière qui, contrairement à la production orthographique écrite, a bénéficié très tôt du développement de la neuroimagerie. Elle est aujourd'hui étudiée, du niveau visuel perceptif jusqu'au niveau langagier, grâce aux techniques les plus avancées permettant de réunir les échelles de l'activité neuronale et du réseau d'aires cérébrales (e.g. Dehaene, Cohen, Sigman, & Vinckier, 2005; Grainger, Rey, & Dufau, 2008; Mechelli et al., 2005; Wandell, 2011). Bien que les travaux sur l'écriture en tant que telle restent moins nombreux, nous avons pourtant de bonnes raisons de penser que les processus cognitifs impliqués, phonologiques et lexicaux, sont pour l'essentiel partagés par ces deux compétences au sein du cerveau (ce que des études récentes ne manquent pas de démontrer : Purcell, Napoliello, & Eden, 2011a; Rapp & Lipka, 2011). L'écriture est pourtant loin de se limiter à ces processus linguistiques « centraux », tel que la diversité des profils des patients atteints de troubles de l'écriture en témoigne.

II. LES AGRAPHIES

II.1. Historique

Contrairement aux autres modalités langagières, ayant bénéficié très tôt du développement des méthodes de neuroimagerie, nos connaissances sur la neuroanatomie de l'écriture sont longtemps restées principalement issues de l'étude des « agraphies ». Le terme agraphie, apparu pour la première fois en 1865 (Benedikt, 1865) a été utilisé deux ans plus tard par William Ogle pour décrire des patients aphasiques présentant des difficultés à s'exprimer par l'écriture (Ogle, 1867). Il propose ainsi que le langage oral et le langage écrit puissent être chacun atteints à des degrés divers, et donc que les centres de l'écriture puissent être distincts des centres de la parole. Mais ce n'est qu'en 1881 que Sigmund Exner, en étudiant là encore les signes cliniques de patients cérébro-lésés, propose une première localisation anatomique d'un tel centre de l'écriture en rapportant que des lésions de la partie postérieure du gyrus frontal moyen (ou « pied de la seconde circonvolution frontale ») peuvent produire des symptômes agraphiques isolés (Exner, 1881). La réalité de l'existence d'une telle aire, depuis appelée « l'aire d'Exner », a suscité de nombreux débats, car, ce que montre une relecture du travail princeps d'Exner (Roux, Draper, Kopke, & Demonet, 2010), est que son hypothèse ne se basait que sur l'étude de quelques patients, dont aucun ne présentait réellement d'agraphie « pure » (i.e. trouble de l'écriture isolé avec préservation des autres fonctions langagières et/ou motrices).

De premières distinctions, entre différents types d'agraphies sont par la suite apparues ; entre une agraphie « primaire » résultant de la perturbation de l'acte moteur d'écriture et une agraphie « secondaire » résultant d'un trouble de la parole (Goldstein, 1948), ou encore entre agraphie « apractique » (apraxique), aphasique ou isolée (Nielsen, 1948). Dans les dernières décennies, les approches neurologiques identifiant les différents symptômes agraphiques découlant d'atteintes neurologiques (lésions cérébrales, démences, etc.) et neuropsychologiques visant plutôt à identifier les différents processus cognitifs atteints dans les agraphies, ont permis d'aboutir à une classification des différents types d'agraphies qui peuvent nous servir de base pour l'étude de l'anatomie fonctionnelle de l'écriture en général (voir par exemple Roeltgen, 2003).

II.2. Les agraphies centrales

Les agraphies centrales ou agraphies linguistiques vont comme leur nom l'indique concerner les troubles affectant les processus centraux de l'écriture. On l'a vu, deux systèmes permettent d'accéder à la représentation orthographique des mots : un système lexical et un système phonologique (e.g. Ellis, 1982). Une agraphie lexicale (Beauvois & Déroutesné, 1981; Roeltgen & Heilman, 1984) va se manifester par une perturbation de la capacité à orthographier des mots irréguliers ou ambigus, avec une relative préservation de la capacité à orthographier des mots réguliers ou des pseudo-mots. La voie lexicale étant atteinte, les patients auront tendance à s'appuyer sur la voie phonologique et ainsi produire des erreurs phonologiquement plausibles. Les lésions provoquant ce type d'agraphie seraient généralement situées dans le gyrus angulaire gauche (Roeltgen & Heilman, 1984) mais ont aussi été rapportées lors de lésions dans le gyrus précentral (Rapcsak, Arthur, & Rubens, 1988) ou dans le cortex temporal postérieur (Croisile, Trillet, Laurent, Latombe, & Schott, 1989; Rapcsak & Beeson, 2004).

A l'opposé, l'agraphie phonologique traduit une perturbation de la capacité à orthographier des mots en utilisant les règles de conversion phonème-graphème (Shallice, 1981). Ce trouble se manifeste donc par une incapacité à orthographier des mots nouveaux ou des pseudo-mots, avec une préservation de la capacité à orthographier des mots familiers, même irréguliers. Les erreurs produites par ce type de patients ne sont généralement pas phonologiquement correctes mais peuvent présenter un certain degré de ressemblance visuelle avec le mot initial. Le site lésionnel principal de l'agraphie phonologique serait selon Roeltgen et al. (1983) le gyrus supramarginal. Une aire qui a en effet, de manière intéressante, été associée à la boucle phonologique de la mémoire de travail, dédiée au stockage temporaire de l'information verbale (Baddeley, 2003). Des travaux ultérieurs rapportent cependant que des lésions dans une région périsylvienne plus vaste, incluant par exemple le gyrus temporal supérieur, peuvent provoquer de tels symptômes (Alexander, Friedman, Loverso, & Fischer, 1992b). Henry, Beeson, Stark, et Rapcsak (2007), utilisant notamment des données antérieures (Rapcsak & Beeson, 2004), ont en effet mis par la suite en valeur une double dissociation (résumée dans la Figure II-2) entre des lésions dites extra-sylviennes (i.e. cortex temporo-occipital inférieur gauche), provoquant un profil d'agraphie lexicale (perturbation de la capacité à écrire des mots irréguliers mais préservation de la capacité à écrire des pseudo-mots) et des lésions périsylviennes gauche (i.e. du gyrus frontal inférieur et précentral au gyrus temporal supérieur), générant plutôt un profil d'agraphie phonologique (i.e. incapacité à orthographier des pseudo-mots mais préservation de la capacité à écrire des mots irréguliers).

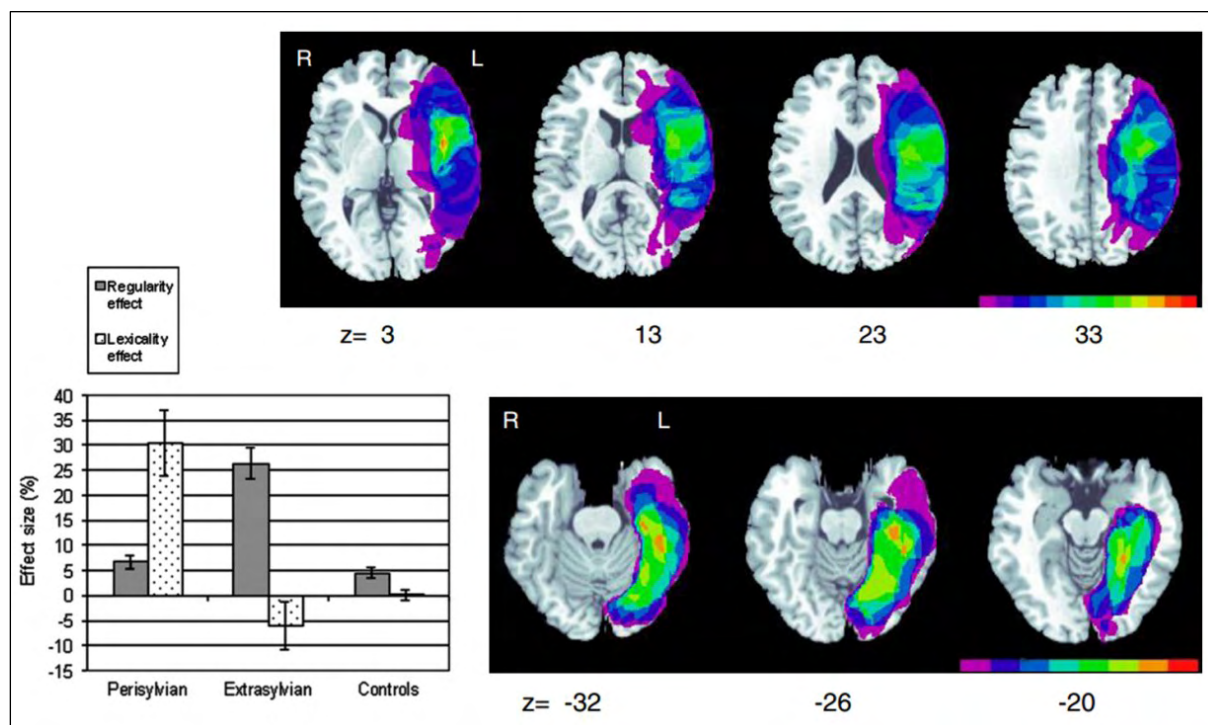


Figure II-2 : Dissociation entre effet de lexicalité (performance pseudo-mots > mots) chez les patients avec lésion périsylvienne (carte de superposition des lésions, en haut, n = 13) et effet de régularité (performance mots réguliers > mots irréguliers) chez les patients avec lésion temporale extra-sylvienne (carte de superposition des lésions, en bas, n = 8). D'après (Henry et al., 2007).

Enfin, une déconnexion entre l'orthographe et le sens des mots est parfois désignée sous le nom d'agraphie sémantique (Roeltgen, Gonzalez Rothi, & Heilman, 1986). Dans ce trouble, les patients perdent la capacité de donner du sens à ce qu'ils écrivent. Ils sont capables d'écrire correctement des mots irréguliers ou des pseudo-mots, démontrant que leurs systèmes lexical et phonologique sont préservés, mais sont par exemple incapables de choisir parmi plusieurs homophones celui qui est cohérent dans le contexte d'une phrase (e.g. écrivent *knight* au lieu de *night* dans la phrase « *The moon comes out at night* »). La localisation anatomique des lésions pouvant conduire à cette l'agraphie sémantique reste vaste et incertaine ; aires frontales et temporo-pariétales gauches, préservant généralement les régions périsylviennes (Rapcsak & Rubens, 1990; Roeltgen et al., 1986). Ces symptômes ont aussi été documentés dans différentes pathologies affectant mémoire sémantique, incluant la maladie d'Alzheimer (Neils, Roeltgen, & Constantinidou, 1995). Dans certains cas, le système sémantique est tout de même préservé, comme en atteste la performance à l'oral, mais c'est l'accès aux représentations orthographiques à partir du système sémantique qui est affecté (*When a rose is a rose in speech but a tulip in writing* ; Hillis, Rapp, & Caramazza, 1999). On parlera ainsi plutôt d'agraphie lexicale avec paragraphies sémantiques.

II.3. Les agraphies périphériques

La capacité à écrire nécessite des capacités motrices préservées mais aussi des praxies : la capacité à tenir correctement le stylo et d'effectuer correctement les mouvements nécessaires à la formation des graphèmes. Ces capacités peuvent être spécifiquement atteintes, sans trouble du langage associé (bien qu'apraxie et aphasie soient souvent associées du fait de la latéralisation à l'hémisphère gauche du langage et du contrôle des mouvements de la main droite). C'est pourquoi on qualifie souvent cette forme d'agraphie dite « apraxique » d'agraphie « pure ». L'agraphie apraxique a été décrite comme une « perte des programmes moteurs pour former les graphèmes » (Roeltgen & Heilman, 1983). Les patients présentant ce trouble sont généralement capable d'épeler mais, lors de l'écriture, produisent des lettres très déformées voire illisibles (Heilman, Coyle, Gonyea, & Geschwind, 1973; Heilman, Gonyea, & Geschwind, 1974). La trajectoire du tracé est lente et imprécise, les mouvements exigent beaucoup d'effort. Des déformations surviennent en écriture spontanée ou sous dictée mais sont améliorées en copie. Dans certains cas, les praxies, dont la capacité à manipuler le stylo, peuvent être préservées (agraphie apraxique sans apraxie, parfois « agraphie idéationnelle »), d'où l'hypothèse de l'existence d'une aire « graphémique » où les engrammes moteurs et visuo-kinesthésiques des lettres seraient stockées (Baxter & Warrington, 1986). Ces différents types d'agraphies périphériques, affectant la programmation motrice, résultent le plus souvent de lésions pariétales (souvent le lobule pariétal supérieur) de l'hémisphère contrôlant la main dominante (Alexander, Fischer, & Friedman, 1992a; Auerbach & Alexander, 1981; Otsuki, Soma, Arai, Otsuka, & Tsuji, 1999). Mais elles peuvent aussi provenir de lésions dans le cortex préfrontal (et concerneraient ainsi l' « aire d'Exner ») (Anderson et al., 1990), l'aire motrice supplémentaire (Watson, Fleet, Gonzalez-Rothi, & Heilman, 1986), ou encore le cervelet droit (Marien et al., 2007). Il a ainsi été proposé que les lésions pariétales endommagent les programmes graphomoteurs alors que les lésions préfrontales interféreraient dans le processus de transformations de ces programmes en une séquence d'activation musculaire appropriée. La Figure II-3 ci-après illustre deux cas d'agraphies apraxiques consécutives à une lésion frontale supérieure gauche et à une lésion pariétale supérieure gauche.

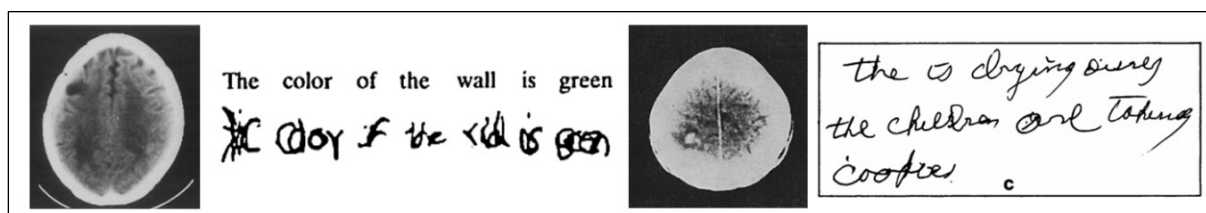


Figure II-3 : Exemple de deux cas d'agraphie apraxique « pure » consécutives à une lésion frontale prémotrice gauche (à gauche ; Anderson et al., 1990) et pariétale supérieure gauche (à droite ; Auerbach & Alexander, 1981).

Avant la sélection et l'exécution de ces schèmes moteurs, nous avons vu que les modèles cognitifs de la production écrite prévoyaient une étape allographique, permettant la sélection de la forme correcte des lettres dans un contexte donné (« code physique des lettres »). Il a en effet été postulé l'existence d'un stock allographique suite à la description de rares patients présentant des praxies normales, des capacités visuospatiales normales, produisant des lettres formées correctement mais produisant des erreurs de casse fréquentes. Ces patients peuvent par exemple présenter des difficultés à passer d'une écriture en majuscule à une écriture en minuscule, voire présenter une écriture perturbée dans un seul des deux formats (Black, Behrmann, Bass, & Hacker, 1989). Certains patients peuvent montrer une incapacité à sélectionner la casse correcte au sein d'un même mot (erreurs « mIxTes » ; De Bastiani & Barry, 1989). La localisation anatomique des lésions affectant ce stock allographique n'est pas claire mais pourrait impliquer une région temporo-pariéto-occipitale.

II.4. Syndrome du buffer graphémique

On classe parfois le syndrome du buffer graphémique au sein des agraphies périphériques, bien que, nous l'avons vu, ce processus est davantage situé à l'interface entre les processus centraux et les processus périphériques. Des perturbations du buffer graphémique engendrent typiquement des omissions, des substitutions ou des insertions de lettres lors de l'écriture ou l'épellation orale de mots, quelle que soit le type de tâche (sous dictée, en dénomination, en copie différée, en épellation orale), comme lors de l'écriture de pseudo-mots (Caramazza et al., 1987; Hillis & Caramazza, 1989). Contrairement à ce que proposent les modèles cognitifs classiques de la production écrite, il pourrait selon Lesser (1990) exister en réalité deux buffers graphémiques différents à l'œuvre dans l'écriture et l'épellation orale. Quoi qu'il en soit, comme il en sera question plus tard lors de nos expérimentations, les erreurs produites par les patients présentant ce type d'agraphie ne sont pas affectées par des facteurs linguistiques comme la fréquence lexicale ou la régularité orthographique mais sont influencées par la longueur des mots. Le nombre d'erreurs tendant à être plus important sur les mots plus longs. Là encore, les lésions pouvant conduire à ce type de syndrome varient, mais concernent généralement une région fronto-pariétale gauche (Hillis & Caramazza, 1989; Lesser, 1990; Miceli & Silveri, 1985). Dans un travail en 2009, Cloutman et al. (2009) ont tenté de localiser la source des déficits du buffer graphémique en superposant et en comparant les cartes cérébrales lésionnelles d'un vaste groupe de patients cérébro-lésés, présentant ou ne présentant pas ce type de déficits. Les résultats ont mis en particulier en évidence une relation entre la présence

des symptômes et des lésions dans les gyrus précentral (BA 6 et BA 4) et postcentral (BA 2 ET BA 3), mais aussi au niveau sous-cortical (noyau caudé).

L'étude des différentes formes d'agraphies, dont la description qui vient d'être faite n'épuise pas la diversité, est encore aujourd'hui une grande source de renseignement dans la recherche sur la neuroanatomie de l'écriture (e.g. Balasubramanian & Cohen, 2014; Rapcsak et al., 2009; Scarone et al., 2009). Les modèles cognitifs ou neuropsychologiques qui en sont issus, comme celui présenté Figure II-4 résumant la localisation anatomique potentielle des principaux processus cognitifs centraux et périphériques impliqués dans la production écrite, nécessitent pourtant encore d'être complétés et validés. Comme pour les autres modalités langagières, le développement de la neuroimagerie a permis, particulièrement dans les 15 dernières années, de grandement approfondir nos connaissances par l'analyse de l'activité cérébrale pendant la réalisation de tâches d'écriture.

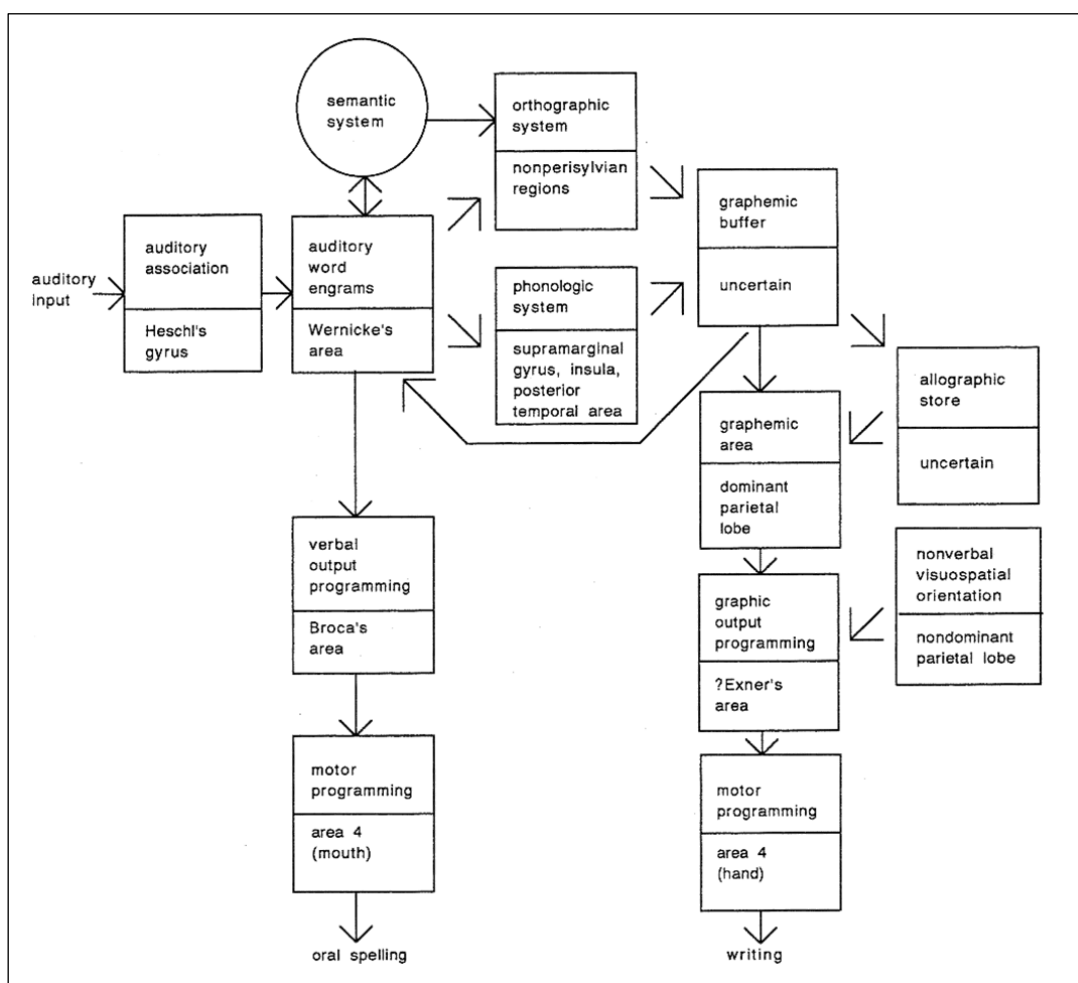


Figure II-4 : Un modèle neuropsychologique de l'écriture (selon Roeltgen, 2003)

III. NEUROIMAGERIE DE L'ÉCRITURE

Comme nous l'avons rappelé plus haut en évoquant l'historique de la recherche en neuropsychologie cognitive du langage, les modèles lésionnels présentent un certain nombre de limites lorsqu'il s'agit de décrire le fonctionnement normal. C'est donc tout naturellement que les chercheurs se tournent aujourd'hui de plus en plus vers les techniques de neuroimagerie fonctionnelle pour étudier les substrats cérébraux de l'écriture.

III.1. Premiers travaux : le réseau cérébral de l'écriture manuscrite

Les premiers travaux ayant utilisé des tâches d'écriture en neuroimagerie n'avaient pas réellement pour objet l'identification d'un « réseau cérébral de l'écriture » et ne visaient pas particulièrement à valider les données issues de la neuropsychologie des agraphies. Seitz et al. (1997) ont ainsi utilisé une tâche impliquant l'écriture répétée d'un seul graphème en TEP pour étudier les corrélats cérébraux du contrôle moteur des trajectoires graphomotrices. En plus de l'important réseau fronto-pariétal dont ils rapportent l'activation, ils mettent déjà en évidence le rôle crucial du cortex pariétal supérieur, et d'une région du sillon pariétal supérieur en particulier, dans cette fonction. Petrides, Alivisatos, et Evans (1995) sont à notre connaissance les premiers chercheurs à utiliser une véritable tâche d'écriture de mots sous dictée, en TEP, parmi plusieurs autres tâches linguistiques visant à évaluer le rôle du cortex frontal ventro-latéral dans la récupération en mémoire. Par comparaison à ces autres tâches linguistiques comme le rappel, à l'oral, de mots préalablement entendus, la tâche d'écriture activait le cortex moteur et sensori-moteur primaire (BA 3 et BA 4), le cortex prémoteur (BA 6), le cortex pariétal supérieur (BA 7, BA 40), le cervelet ou encore le cortex temporal postérieur (BA 37). Au-delà de la mise en évidence des principales composantes de ce réseau cérébral de l'écriture manuscrite qui sera observé par la suite, ils notent une certaine proximité de l'aire temporale observée active avec celle décrite dans l'agraphie lexicale.

Menon et Desmond (2001) ont utilisé quelques années plus tard l'IRMf et focalisé leur attention sur le rôle du cortex pariétal lors de l'écriture de phrases. Le cortex pariétal de l'hémisphère dominant étant, on l'a vu, considéré comme un des principaux sites lésionnels de l'agraphie. Leurs résultats confirment la forte implication du lobe pariétal supérieur gauche (BA 5 et 7), par rapport au cortex pariétal inférieur (BA 39 et BA 40), mais ces auteurs observent aussi l'activation d'une aire frontale pouvant correspondre à la traditionnelle aire d'Exner.

III.2. L'identification des « centres de l'écriture »

Ce n'est donc qu'à partir des années 2000 que vont être conduites les premières études sur l'écriture en tant que telle. Les japonais Katanoda, Yoshikawa, et Sugishita (2001) ont posé les bases de l'étude de l'écriture en neuroimagerie en proposant à leur sujets, en plus d'une tâche d'écriture (dénomination écrite d'images), des tâches contrôles linguistique (dénomination subvocale d'images) et motrice (« finger tapping » : tapoter du doigt en réponse à un point présenté visuellement à l'écran). L'objectif de ce travail était d'identifier les « centres de l'écriture », dont l'existence est présumée par les descriptions neuropsychologiques des cas d'« agraphie pure ». Ainsi il doit exister des aires actives lors de l'écriture du nom d'une image mais pas lors de la prononciation de ce même mot, et actives lors de la réalisation du geste d'écriture mais pas lors de la réalisation d'un geste moteur sans signification. Comme on peut le voir sur la Figure II-5, après réalisation de deux contrastes d'imagerie (identifiant les aires davantage activées lors de l'écriture par rapport à la dénomination subvocale, puis par rapport au *finger tapping*), une analyse de conjonction a permis à Katanoda et al. (2001) d'identifier trois aires remplissant ces conditions ; la partie antérieure du lobule pariétal supérieur gauche, la partie postérieure du gyrus frontal supérieur, et le cervelet droit.

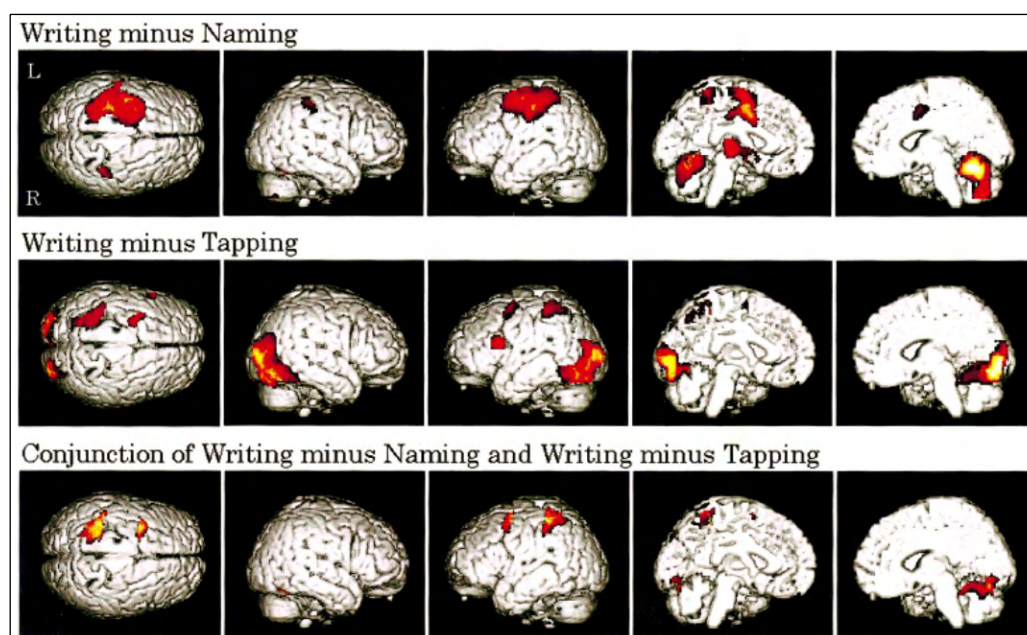


Figure II-5 : Cartes d'activations rapportées par Katanoda et al. (2001) comparant une tâche de dénomination écrite en IRMf à une tâche de dénomination et à une tâche de *finger tapping*, puis le résultat de la conjonction de ces deux contrastes.

La tâche d'écriture utilisée dans ce dernier travail impliquait de tracer avec le doigt des phonogrammes japonais (Kana), mais un paradigme semblable a par la suite été utilisé en anglais par Beeson et al. (2003). La tâche d'écriture utilisée ici était une tâche de « génération »,

dans laquelle les sujets devaient écrire des mots en réponse à une consigne du type « Ecrivez des noms d'animaux ». Là encore, une tâche contrôle linguistique (du type « Pensez à des noms de fruits »), ainsi qu'une tâche contrôle motrice dans laquelle les sujets devaient tracer des cercles de manière continue, étaient employées pour contrôler d'un côté les processus centraux (non spécifiques de l'écrit) et d'un autre côté les processus périphériques (visuo-kinesthésiques et sensori-moteurs). Une tâche d'écriture des lettres de l'alphabet était de plus introduite. Les contrastes comparant les activations dans ces différentes tâches semblaient supporter l'hypothèse d'un rôle des régions prémotrice et pariétale supérieure dans la transformation de l'information orthographique en commandes motrices. Cette dernière aire était de plus conjointement activée dans la tâche d'écriture de mots et la tâche d'écriture des lettres de l'alphabet. Beeson et al. (2003) soulignent aussi dans leur travail l'activation du gyrus fusiforme (BA 37), en lien avec la récupération orthographique, par opposition à l'absence d'activation du gyrus angulaire, une aire pourtant classiquement associée, depuis Dejerine (1891), à l'orthographe.

La recherche des centres de l'écriture par le biais de l'IRMf s'est poursuivie au Japon avec Sugihara, Kaminaga, et Sugishita (2006), qui ont utilisé un paradigme très semblable à celui de Katanoda et al. (2001) en demandant à leurs sujets de dénommer des images, soit de manière silencieuse (dénomination subvocale) soit en traçant les caractères (Kanas japonais) avec le doigt. Ils introduisent cependant une nouvelle condition dans laquelle les sujets doivent utiliser leur main gauche pour écrire. L'idée simple derrière cette modification du paradigme est que les processus « spécifiques » de l'écriture ne dépendent pas de l'effecteur utilisé ; si une activité motrice d'écriture avec la main droite implique une activation du cortex moteur gauche, et une activité motrice d'écriture avec la main gauche une activation du cortex moteur droit, les aires communément actives dans les deux conditions représentent des processus non moteurs de l'écriture. Chaque tâche étant préalablement contrastée avec la tâche de dénomination, on ne peut donc pas non plus affirmer que ces aires ont trait au traitement linguistique du stimulus présenté. Trois centres de l'écriture ont été identifiés dans l'hémisphère gauche par cette méthode : la terminaison postérieure du gyrus frontal supérieur, la partie antérieure du lobule pariétal supérieur et la partie antérieure du gyrus supramarginal. Il se confirme donc que deux régions de l'hémisphère, au niveau du sillon frontal supérieur et du sillon intrapariétal jouent un rôle crucial dans l'écriture manuscrite. Elles correspondent en effet à des sites lésionnels classiques de l'agraphie « pure », ou du moins de l'agraphie apraxique sans trouble de la parole associé. La nature de leur contribution respective est beaucoup moins claire : génération des programmes moteurs pour l'aire frontale contre capacité à guider visuellement le mouvement pour l'aire pariétale ? L'identification du gyrus supramarginal, en tant que « centre de l'écriture » est, elle, moins commune, et n'a pas été véritablement répliquée dans d'autres travaux de

neuroimagerie. L'activation d'une telle aire, dont on a vu qu'elle aurait un rôle phonologique dans l'écriture (Roeltgen et al., 1983), découle peut-être de l'utilisation de Kanas japonais, dont l'écriture s'appuie particulièrement sur le processus de conversion phonème-graphème (Sugihara et al., 2006).

C'est une même combinaison de tâches : écriture de mots sous dictée, répétition orale de mots et traçage de cercles, cette fois avec des caractères alphabétiques en français, qui a permis à Roux et al. (2009) d'isoler une aire cruciale pour l'écriture dénommée « GMFA » (pour « Graphemic/Motor Frontal Area»). Cette aire située au niveau de la partie postérieure du sillon frontal supérieur (BA 6) et concordant donc avec les observations précédentes (notamment de Sugihara et al., 2006), correspondrait à l'aire frontale traditionnellement désignée comme « l'aire d'Exner ». Dans leur étude utilisant l'IRMf, Roux et al. (2009) ont en effet montré que cette aire circonscrite était active, une fois prises en compte les différentes tâches contrôles, aussi bien chez des sujets droitiers, que chez des sujets gauchers, et ce, quelle que soit la main utilisée pour écrire (e.g. droitiers écrivant avec la main gauche) (voir Figure II-6, en haut). De manière intéressante, cette aire se révélait bilatérale, même chez les droitiers (dont le langage est réputé pour être essentiellement latéralisé à gauche). Les auteurs ont par conséquent proposé que cette aire (GMFA) puisse supporter un processus à l'interface entre les processus centraux et périphériques de l'écriture, dans le transcodage des représentations orthographiques ou graphémiques abstraites des mots en programmes moteurs « allographiques » (les dynamiques et trajectoires qui donnent notamment un « style graphique » à l'écriture de chacun). L'originalité de ce travail réside surtout dans le fait qu'il présentait aussi des résultats concordants (i.e. sur l'identification de la GMFA) issus d'expérimentations utilisant la technique de stimulation corticale directe (dont il sera question plus loin). Ainsi, une stimulation électrique de cette région frontale supérieure chez des patients pendant une opération du cerveau pouvait provoquer des symptômes semblables à l'agraphie pure : une perturbation de l'écriture sans affecter d'autres tâches langagières (e.g. dénomination orale), ni même provoquer de contraction musculaires de la main (la localisation de ces sites de stimulation est illustrée Figure II-6, en bas). Le tracé graphique de ces patients pendant la stimulation était lent et pauvre et pouvait aller jusqu'à l'arrêt total de l'écriture.

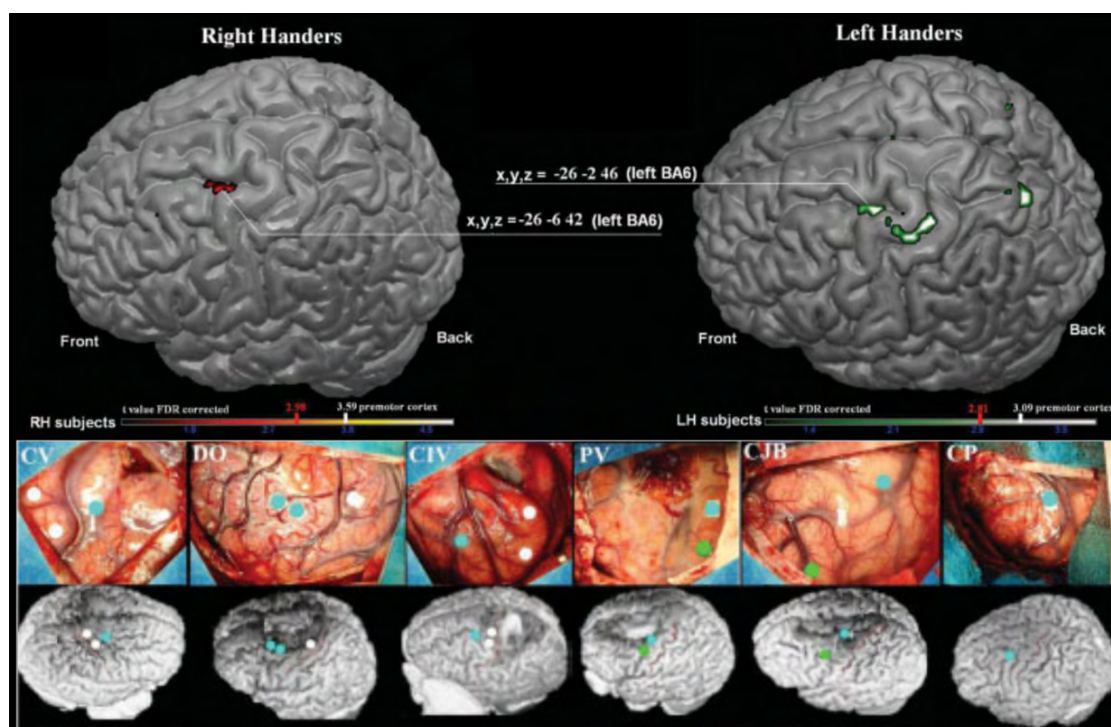


Figure II-6 : Résultats de Roux et al. (2009) identifiant l'aire GMFA. En haut, résultats d'IRMf chez les sujets droitiers et gauchers. En bas, extrait des résultats de l'expérimentation de stimulation corticale directe. Les points bleus ciel représentent les sites « d'agraphie pure ».

De manière intéressante, les deux aires dont de plus en plus de travaux s'accordent à démontrer la contribution cruciale dans le processus d'écriture s'avèrent sensibles à la longueur des mots écrits (Rapp & Dufor, 2011). En effet, cette expérimentation (dont d'autres aspects seront évoqués plus loin) a comparé l'écriture de mots courts et longs dans le but d'identifier le siège de la mémoire de travail orthographique (i.e. le buffer graphémique). Au sein du réseau de l'écriture préalablement localisé, le sillon frontal supérieur (BA 6) et le lobule pariétal supérieur (BA 7) démontraient une telle sensibilité, malgré une « quantité d'activité motrice » contrôlée (i.e. les sujets devaient écrire en continu, que le mot soit court ou long). Les auteurs ajoutent ensuite que lors d'une analyse plus rigoureuse utilisant uniquement les résultats issus d'une partie de leurs stimuli (i.e. afin que le nombre de lettres réellement écrites diffère au minimum), seule l'aire frontale montrait réellement une activité sensible à la longueur.

III.3. Travaux récents : processus centraux de l'écriture

L'engouement pour l'étude des substrats cérébraux de la production écrite en neuroimagerie s'est récemment développé et a conduit à l'utilisation de paradigmes expérimentaux variés, guidés par des objectifs différents, Harrington, Farias, Davis, et Buonocore (2007) se sont ainsi par exemple intéressés à l'écriture « imaginée » qu'ils comparent à l'écriture

réelle ou au dessin. La différence observée entre écriture réelle et imaginée se situait principalement au niveau du cortex moteur, ce qui démontre que l'essentiel du vaste réseau de l'écriture classiquement observé (gyrus frontal inférieur, précentral, pariétal supérieur et inférieur, temporal postérieur, aire motrice supplémentaire) ne dépend pas de la réalisation effective ou non d'un mouvement. La comparaison avec le dessin mettait, elle, en évidence une plus forte latéralisation à gauche de l'écriture. Mais plutôt que de simplement chercher à isoler dans le réseau cérébral de l'écriture certaines de ses composantes les plus spécifiques par le biais de tâches contrôles à la fois langagières et motrices, plusieurs auteurs se sont intéressés aux comparaisons directes entre l'écriture et d'autres compétences langagières. L'implication du cortex pariétal supérieur serait ainsi un des principaux marqueurs de l'activité d'écriture par rapport à la parole, quand le cortex pariétal inférieur (gyrus angulaire) représenterait un centre « amodal » de la communication, commun à ces deux tâches (Brownsett & Wise, 2010). La seule étude qui ait, à notre connaissance, utilisé la méthode des potentiels évoqués en électro-encéphalographie pour étudier l'écriture, a en outre démontré une période d'activité cérébrale globalement « commune » à des tâches de dénomination à l'oral et à l'écrit (i.e. de 0 à 260 ms post-stimulus : traitements visuels et lexico-sémantiques), mais qui divergerait ensuite selon le type de tâche (selon l'amplitude de l'activité et la configuration topographique de celle-ci), suggérant ainsi des processus cognitifs sous-jacents différents (Perret & Laganaro, 2012).

La production écrite implique en effet différents processus au niveau central, que les modèles à double-voie ont tendance à dissocier entre processus phonologiques (i.e. voie phonologique et conversion phonème-graphème) et lexico-orthographiques (voie lexicale). L'étude des agraphies nous a effectivement démontré l'existence de sites anatomiques spécifiques pour ces deux classes de processus que l'on devrait pouvoir aussi mettre en évidence en utilisant la neuroimagerie. La tâche de lecture, qui implique des processus orthographiques similaires à l'écriture a ainsi pu être utilisée à cette fin. La comparaison d'une tâche orthographique (il ne s'agissait pas ici d'écriture mais de tâches de décision du type « cette lettre était-elle présente dans le mot précédemment présenté ») et d'une tâche de lecture de mots conclut à l'existence d'activations communes au niveau du gyrus frontal inférieur gauche et du gyrus fusiforme (Rapp & Lipka, 2011). Ce qui confirme notamment l'hypothèse du rôle de la région temporale postérieure et inférieure (gyrus fusiforme, correspondant à la « VWFA ») dans l'accès ou le stockage des représentations orthographiques. Cette aire, parfois associée à l'agraphie lexicale (voir plus haut ; Rapcsak & Beeson, 2004), a en effet souvent été observée en neuroimagerie lors de l'écriture, particulièrement lors de l'écriture de d'idéogrammes japonais (de Kanjis) (Nakamura et al., 2002; Nakamura et al., 2000). Une telle spécificité à cette forme d'écriture (par rapport au Kana) a ainsi été interprétée comme reflétant les plus grandes demandes envers une « mémoire visuelle graphique » qu'elle requiert (Matsuo et al., 2001).

Les liens entre lecture et écriture ont aussi été étudiés par Purcell et al. (2011a) au moyen d'une tâche d'écriture sur clavier d'ordinateur. Le réseau mis en évidence, dans ce premier travail en IRMf ayant étudié cette forme moderne d'écriture, était très similaire à celui d'écriture « classique » observé par leurs prédécesseurs, et incluait notamment l'aire frontale au niveau du gyrus frontal supérieur/moyen (i.e. la GMFA). La comparaison avec la lecture les a conduit à un résultat en partie semblable à celui de Rapp et Lipka (2011) ; une région du gyrus frontal inférieur gauche (BA 44) était en effet la seule aire d'activation commune entre la tâche de production orthographique et une tâche de lecture (après des contrastes utilisant des tâches contrôles non langagières). Les auteurs ajoutent cependant qu'une portion de cette aire démontrait une activation spécifique à la modalité écrite.

Afin d'identifier l'aire du stockage ou des représentations orthographiques de la voie lexicale (i.e. lexique orthographique ou « mémoire à long-terme orthographique »), Rapp et Dufor (2011) ont manipulé dans une tâche d'écriture sous dictée en IRMf la fréquence lexicale des mots écrits, arguant que les mots fréquents sont souvent les plus préservés lorsque le lexique orthographique est endommagé. C'est là encore la région frontale inférieure (jonction frontale inférieure, proche de BA 44) qui démontre une sensibilité à la fréquence lexicale et qui serait le siège du lexique orthographique (en réalité, on observe aussi le putamen, le thalamus et le cortex cingulaire antérieur ; une analyse en région d'intérêt suggère que ce soit aussi le cas pour la région temporale postérieure-inférieure). Pourtant, c'est un résultat en apparence contradictoire, concernant la même aire frontale inférieure, qui était rapporté par Omura, Tsukamoto, Kotani, Ohgami, et Yoshikawa (2004). En combinant plusieurs tâches, d'écriture sous dictée de phonogrammes japonais sans signification, d'écriture de symboles sans signification, ou de répétition orale, ces auteurs ont en effet localisé l'aire de la conversion des phonèmes en graphèmes justement dans une région prémotrice ventrale proche de l'aire de Broca (BA 6 / BA 44). Dès lors, l'effet de fréquence obtenu par Rapp et Dufor (2011), d'une aire davantage activée lors de l'écriture de mot rares, pourrait en réalité refléter une plus grande demande sur la voie de conversion phonème-graphème que la production de ce type de mots requiert. Il se confirme donc qu'une région frontale inférieure présente des activations qui en font une bonne candidate pour supporter certains processus centraux à l'œuvre dans la production écrite. Pourtant, les questions de sa localisation (cortex prémoteur, BA 6 ; ou cortex frontal inférieur, BA 44), de sa fonction précise (conversion phonème-graphème ou lexique orthographique) et de son éventuelle spécificité à la production doivent encore être élucidées.

Enfin, certaines données de neuroimagerie récentes, utilisant des techniques d'analyses de la connectivité fonctionnelle, permettent de proposer un rôle du lobule pariétal supérieur dans l'écriture plus complexe (et plus central) qu'envisagé auparavant. Par le biais de cette

méthode, qui étudie les modulations, au travers de différentes tâches, de la corrélation de l'activité BOLD entre différentes régions distantes (*psychophysiological interactions* ; voir Friston et al., 1997), Segal et Petrides (2012) ont en effet observé que l'activité d'un voxel représentant une portion du lobule pariétal supérieur, activé lors de l'écriture, présentait des corrélations d'activité avec différentes aires selon la tâche réalisée. Cette activité était par exemple corrélée avec le gyrus supramarginal antérieur, une région associée aux traitements phonologiques, lorsque l'orthographe du mot était récupérée à partir d'une image (i.e. dénomination), mais était plutôt corrélée avec le gyrus angulaire, une région associée à la lecture, pendant la copie de mots. Les auteurs en ont conclu que cette aire restreinte (partie rostrale du lobule pariétal supérieur, aire PE), plutôt qu'un « centre de l'écriture » proprement dit, jouerait un rôle de contrôle moteur de haut-niveau, interagissant avec les aires du langage et les aires motrices pendant l'écriture.

IV. APPORTS DES TECHNIQUES DE STIMULATION CEREBRALE

Au-delà des techniques d'imagerie désormais « traditionnelles » (e.g. TEP, IRMf), il se développe de plus en plus de nouveaux moyens d'améliorer notre compréhension de l'anatomie fonctionnelle des grandes fonctions cognitives. Bien que ces nouvelles techniques d'imagerie (e.g. tractographie), méthode d'analyse des données d'imagerie (e.g. connectivité effective), ou de stimulation cérébrale (e.g. stimulation magnétique transcrânienne) aient encore été rarement utilisées pour étudier la production écrite du langage, on peut tirer des informations cruciales de quelques études ayant récemment utilisé la technique, en réalité ancienne (Penfield & Roberts, 1959), de stimulation corticale directe.

IV.1. Stimulation corticale directe et écriture

Lors d'opérations de neurochirurgie visant à l'ablation de tumeurs cérébrales, les praticiens sont parfois amenés à réveiller le patient au cours de l'opération, dans le but de réaliser une cartographie des aires du langage pour donc être en mesure de les épargner (Roux, Boetto, Sacko, Chollet, & Tremoulet, 2003). Cette technique, qui a notamment été utilisée pour mettre en exergue la GMFA (cf. plus haut, Figure II-6), consiste à appliquer un courant électrique de faible intensité et de manière très localisée à la surface du cortex alors que sujet réalise certaines tâches. Roux et al. (2003) ont par exemple rapporté que de telles stimulations de la région du gyrus angulaire pouvait provoquer un ensemble de symptômes connu dans le « syndrome de Gerstmann » : agnosie des doigts (incapacité à reconnaître, nommer ses doigts),

acalculie (trouble du calcul mental) et agraphie (écriture déformée ou illisible, arrêt de l'écriture, mots répétés). Lors de travaux étudiant plus spécifiquement l'écriture, une grande variété de perturbations (arrêt de l'écriture, forme des lettres irrégulière, erreurs dans la sélection des lettres, paraphrasies), avec une certaine variabilité interindividuelle, a pu être observée via cette technique lors de stimulations dans plusieurs régions du cortex frontal (Lubrano, Roux, & Demonet, 2004). Ces perturbations affectaient souvent aussi la lecture ou la dénomination orale d'images. Une région provoquant des symptômes d'agraphie pure, la GMFA, n'a donc été isolée par Roux et al. (2009) que quelques années plus tard.

Cette même méthode a été utilisée par les italiens Magrassi, Bongetta, Bianchini, Berardesca, et Arienta (2010) pour étudier les fonctions spécifiques du centre pariétal de l'écriture chez deux patients. Contrairement à ce que l'on pouvait attendre, du fait de l'association du lobule pariétal supérieur avec des formes d'agraphies périphériques (e.g. Alexander et al., 1992a), la stimulation de cette région pouvait provoquer des erreurs lexicales en écriture sous dictée. En effet, dans certains cas la forme des lettres était très altérée, incluant parfois une micrographie et une désorganisation spatiale de l'écriture, jusqu'à un arrêt total (sans pour autant causer d'altération purement motrice), mais dans d'autres cas la forme des lettres était préservée et les erreurs étaient lexicales (le mot écrit est différent de celui dicté) ou graphémiques (pseudo-mots produits par remplacement ou insertions de certains graphèmes). Le rôle d'interface entre les aires langagières et les aires motrices de cette aire, tel que proposé par Segal et Petrides (2012) (qui rapportent une connectivité fonctionnelle différente, avec différentes aires cérébrales, selon les demandes linguistiques de la tâche d'écriture) pourrait peut-être expliquer une telle survenue inattendue d'erreurs lexicales lors de sa stimulation.

La technique de stimulation corticale directe a aussi été récemment mise à profit par notre équipe pour étudier les processus centraux à l'œuvre dans l'écriture, en particulier pour étudier la contribution des régions temporo-pariétales (Roux et al., 2014). Au travers des 30 patients dont le cortex était stimulé, plusieurs sites ont été identifiés comme pouvant provoquer des perturbations de l'écriture (62 sites répartis sur 24 patients). Ces perturbations étaient soit sémantiques : le patient écrit un mot différent de celui dicté, mais de manière orthographiquement correcte (e.g. le patient écrit « le pain est musique » au lieu de « le pain est tendre ») (les sites de stimulations provoquant de telles interférences sont présentées en vert sur la Figure II-7, a) ; soit phonologiques : répétition, omissions, transpositions de consonnes, production de jargon (e.g. « ghaise jest tolie » pour « chaise est jolie ») (sites présentées en bleu ciel sur la même figure). Les sites corticaux dont la stimulation pouvait induire ces deux types de perturbations étaient donc assez dispersés le long du gyrus temporal supérieur et au niveau du cortex pariétal inférieur (gyrus supramarginal), mais une certaine organisation fonctionnelle

hiérarchique de ces sites d'interférence, entre une voie sémantique dorsale, pariétale, et une voie phonologique ventrale, temporale, semble se confirmer (voir Figure II-7, b)).

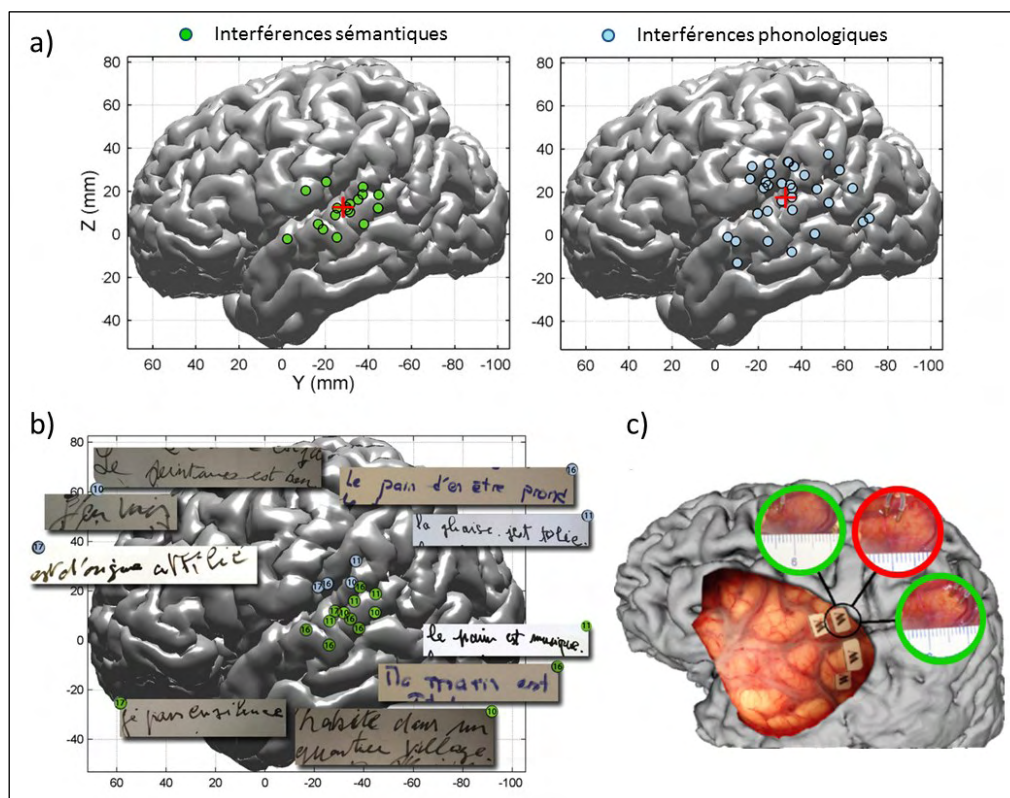


Figure II-7 : Résultats rapportés par Roux et al. (2014) dans une expérimentation utilisation la stimulation corticale pour cartographier les fonctions d'écriture dans le cortex temporo-pariétal. a) Localisation des sites corticaux dont la stimulation provoquait des interférences sémantiques ou phonologiques. **b)** Localisation de ces sites dans un sous-groupe de 4 patients illustrant la dissociation entre une voie ventrale et une voie dorsale. **c)** Photographie illustrant le caractère extrêmement localisé de ces sites d'interférence : écart ~5 mm entre le site provoquant des interférences (cercle rouge) et les sites voisins n'en provoquant pas (cercles verts).

Un résultat semblable et complémentaire a été rapporté par la même équipe en lecture, en utilisant le même type de méthodologie : interférences phonologiques (lecture de pseudo-mots) plutôt lors de la stimulation du gyrus supramarginal antérieur, et interférences plutôt lexicales (lecture de mots) lors de la stimulation temporelle supérieure (Roux et al., 2012). En outre, Roux et al. (2014) montrent dans leur travail sur l'écriture que les sites corticaux dont la stimulation provoquait des perturbations possédaient des frontières distinctes et étaient d'étendue très réduite. Une stimulation sur une zone particulière pouvait avoir un effet sur l'écriture alors qu'une stimulation d'une autre zone à seulement 5 mm sur le côté pouvait n'en produire aucun (voir Figure II-7, c)). Ce constat, d'une importante dispersion inter- et intra-individuelle de ces sites et de leur caractère extrêmement localisé explique probablement pourquoi des activations temporelles sont très rarement rapportées en neuroimagerie de

l'écriture, et démontre ainsi la nécessité de s'appuyer sur un ensemble de différentes techniques pour la constitution d'un modèle neuro-fonctionnel de la production écrite complet et valide.

IV.2. Stimulation magnétique transcrânienne, langage et écriture

La stimulation magnétique transcrânienne (ou TMS) est une technique (sur laquelle nous reviendrons plus en détail plus loin, cf. Chapitre IV.II) permettant notamment de provoquer des « lésions cérébrales virtuelles » localisées, de manière temporaire et non invasive (Pascual-Leone, 1999). Bien que des effets de « haut niveau » de la TMS soient plus difficiles à obtenir que des effets purement moteurs, le langage fait partie des fonctions cognitives étudiées chez le sujet sain via cette technique. Un arrêt sélectif de la parole spontanée peut par exemple être provoqué en stimulant de manière répétitive (on parle de rTMS) à basse fréquence (stimulation réputée inhibitrice) la région frontale postérieure-inférieure (correspondant au cortex moteur de la face). Une stimulation inhibitrice de l'aire de Wernicke (mais pas celle de l'aire de Broca) pendant la réalisation d'une tâche améliorerait, paradoxalement, les performances de perception de la parole (Andoh et al., 2006). Une stimulation rTMS haute fréquence (stimulation réputée excitatrice) de la partie antérieure de l'IFG gauche (pars orbitalis) perturberait davantage les aspects sémantiques (Devlin, Matthews, & Rushworth, 2003) quand une stimulation plus postérieure (pars opercularis) affecterait plutôt les aspects phonologiques (Nixon, Lazarova, Hodinott-Hill, Gough, & Passingham, 2004). Les capacités de la TMS à moduler l'activité cérébrale de manière non invasive sont aussi beaucoup utilisées chez les patients cérébro-lésés ou les patients psychiatriques avec une visée clinique de réhabilitation. Une stimulation inhibitrice de la pars triangularis de l'hémisphère droit chez des patients aphasiques a ainsi par exemple été décrite comme bénéfique dans des tâches de dénomination (Naeser et al., 2005; Naeser et al., 2010). Un tel effet peut être interprété comme résultant du rétablissement d'une certaine balance interhémisphérique ; la lésion de la région gauche entraînerait une levée de l'inhibition normalement exercée sur son homologue droite, se traduisant par une hyperactivité neuronale à droite (empêchant la bonne récupération de l'aphasie). La rTMS viendrait contrecarrer cette hyperactivité.

Il n'existe à notre connaissance qu'une seule étude ayant utilisé cet outil en combinaison avec une tâche d'écriture chez le sujet sain. Ueki et al. (2006) ont ainsi observé qu'une stimulation basse fréquence (0,9 Hz) du cortex temporal postérieur inférieur (PITC) avait pour effet une augmentation des latences dans une tâche de transcription de Kana (phonogrammes japonais) en Kanjis (idéogrammes japonais). Aucun effet n'était cependant visible sur une tâche de copie. Dans la pathologie, une étude a récemment montré qu'une stimulation rTMS (5 Hz) de

l'aire motrice supplémentaire (SMA) chez des patients parkinsoniens permettait d'améliorer temporairement les symptômes affectant l'écriture (on qualifie souvent l'écriture de ces patients, caractérisée par des mouvements hypométriques, de « micrographie ») (Randhawa, Farley, & Boyd, 2013). Bien que ces deux études ne rapportent pas d'effets « massifs » de la stimulation sur les capacités d'écriture (comme on peut par exemple en observer lors de la stimulation corticale directe), elles démontrent néanmoins la capacité de la TMS à provoquer certaines modulations comportementales dans une tâche d'écriture.

Nous avons vu que nos connaissances actuelles sur la neuroanatomie de l'écriture proviennent, comme cela est le cas pour de nombreuses fonctions cognitives, d'une combinaison d'approches (études neuropsychologiques, de neuroimagerie, de stimulation cérébrale), chez le patient cérébro-lésé comme chez le sujet sain. Nous avons ainsi décrit un vaste réseau cérébral, impliquant des régions frontales, pariétales et temporales et évoqué les hypothèses généralement avancées quant au rôle fonctionnel de chacune d'entre elles. Pourtant l'écriture est, notamment en neuroimagerie, un sujet d'étude récent et plusieurs résultats nécessitent d'être répliqués. De nombreuses questions demeurent en outre autour de la problématique amorcée à la fin du XIX^{ème} siècle : y a-t-il un centre cérébral de l'écriture ?

CHAPITRE III : PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS GENERAUX

La production écrite est un objet d'étude encore aujourd'hui moins exploré que d'autres compétences langagières. Plusieurs questions théoriques nécessitent d'être abordées et plusieurs résultats nécessitent d'être reproduits et validés. Nous tâcherons dans ce chapitre de préciser les problématiques et objectifs, selon les deux axes de notre travail ; de psycholinguistique puis de neuroanatomie fonctionnelle, qui ont motivé et guidé la conduite des expérimentations qui seront présentées par la suite.

I. PROCESSUS CENTRAUX ET PERIPHERIQUES : CONCEPTION SERIELLE OU EN CASCADE ?

L'objectif général d'une partie des travaux qui seront présentés plus loin était, au travers du recueil de la dynamique de la production écrite (essentiellement des latences et des durées d'écriture), de contribuer au débat sur le lien dynamique entre processus centraux et périphériques. Nous l'avons vu, les modèles de la production de l'écriture (Ellis, 1982, 1988; Margolin, 1984; Rapp et al., 2002; Roeltgen, 2003) font généralement une distinction entre les processus centraux ou linguistiques (sémantiques, lexicaux, phonologiques et orthographiques) et les processus périphériques (sélection des allographes, génération et exécution des schèmes moteurs). Comme nous l'avons vu précédemment (cf. Chapitre I.II.3), il existe un débat, dérivé des travaux sur l'accès lexical à l'oral, sur l'organisation temporelle de ces processus centraux et périphériques dans l'écriture. Selon une conception sérielle, défendue notamment par Damian et Stadthagen-Gonzalez (2009), les étapes centrales du traitement seraient entièrement résolues avant le déclenchement du geste moteur. Ces chercheurs ont en effet montré que des effets de facilitation phonologique dans une tâche de dénomination avec un distracteur relié se traduisaient uniquement dans le comportement par une diminution des latences ; les durées d'écriture n'étaient pas affectées. Les étapes de planification et d'exécution seraient encapsulées et se succéderaient de manière sérielle. Selon une conception en cascade (ou en parallèle) au contraire, notamment défendue par Delattre et al. (2006), les étapes centrales seraient encore actives une fois débutée la production. Les résultats que ces chercheurs ont obtenus en écriture sous dictée montrant en effet qu'au-delà des latences, les durées d'écriture sont rallongées en

présence d'une séquence irrégulière. L'effet d'irrégularité intervenant pourtant au niveau central (conflit entre la représentation orthographique fournie par la voie lexicale et celle fournie par le processus de conversion phonème-graphème). Nous proposerons (cf. Chapitre V) d'étayer cette conception en cascade à travers deux expériences dans lesquelles des adultes réaliseront des tâches d'écriture sous dictée par lesquelles nous testerons des effets de régularité/consistance orthographique à différentes positions au sein de mots de différentes longueurs.

I.1. Les limites de l'analyse de la consistance

Les résultats obtenus par Delattre et al. (2006) suggèrent que l'exécution motrice ou son contrôle ne constituent pas une étape complètement dissociée de la préparation centrale ou linguistique du message, le temps de réaction ne serait donc pas un indicateur comportemental suffisant de ce qui se joue lors de l'écriture. La réplication ou le développement de ces résultats nous semble cependant se heurter à certaines difficultés.

La conception de la régularité, ou plutôt de la consistance, utilisée dans ce travail comme dans une majorité de travaux actuels en français, s'appuie sur des calculs réalisés sur des mots qui ne sont pas complètement représentatifs de l'ensemble des mots de la langue. La base de données LEXOP (Peereboom & Content, 1999), la plus utilisée, fournit en effet des mesures de consistance complètes et détaillées sur un nombre conséquent de mots mais ne contient que des monosyllabiques. Des études de taxinomie linguistique permettant de dresser une typologie des langues, basées sur le corpus lexical ULSID comportant 16 langues, ont en effet présenté le français comme une des langues qui contient le taux le moins important de mots monosyllabiques (Vallée & Rousset, 2004). Ce problème de représentativité des monosyllabiques en français pose la question de la généralisation à l'ensemble des mots de la langue d'effets observés via l'utilisation de cette unique catégorie de mots. La question d'un éventuel impact sur la consistance se pose d'autant plus dans la mesure où des mots plus longs sont davantage susceptibles de contenir certains préfixes et suffixes courants, comme par exemple le suffixe {-ment} signifiant « de façon » (comme dans *douce-ment*), le suffixe {-isme}, évoquant une opinion ou attitude (*social-isme*), le préfixe {re-} indiquant la répétition (*re-dire*), etc., ou encore les multiples terminaisons des verbes conjugués. Une présence suffisamment importante dans la langue de telles unités est par là même susceptible d'influencer la force de l'encodage dans notre système cognitif des relations entre certaines unités phonologiques et orthographiques (ce qu'évalue théoriquement la consistance). Nous préférons ainsi plutôt nous tourner vers une conception de la régularité telle que proposée par Lecours (1996) et

Soum (1997) qui fournit des mesures de régularité des relations phonologie-orthographe s'appuyant sur l'ensemble des mots de base de données BRULEX (Content et al., 1990) contenant 35 746 entrées lexicales. Nous tenterons de montrer par ailleurs que la réalisation de nos propres calculs de consistance, restreintes à certaines unités du mot (initiale et finale), mais se basant sur un large échantillon de mots, peut être une approche valide.

Le problème posé par l'absence à l'heure actuelle de mesures de consistance complètes sur des mots de plus d'une syllabe relève d'une question théorique, liée à la représentativité de la mesure, particulièrement cruciale lorsque l'on utilise ces mesures dans des expérimentations s'intéressant aux interactions entre la régularité orthographique et la longueur des mots.

I.2. Le buffer graphémique et l'effet de longueur

L'impact de la charge en mémoire au sein du buffer graphémique a été assez peu étudié en lien avec le débat sur l'organisation temporelle des processus centraux et périphériques qui nous intéresse. Il a pourtant été montré que les patients atteints d'un déficit du buffer graphémique montrent une certaine sensibilité à la longueur des mots (e.g. augmentation du taux d'erreurs orthographiques sur les mots plus longs). Les modèles comme celui de Rapp et al. (2002) prévoient que chacun des graphèmes du mot à écrire, issus des deux voies, soient activés au sein d'une « couche graphémique ». Le buffer graphémique (ou la mémoire de travail orthographique) aura pour rôle de stocker temporairement cette représentation en vue de sa transcription. C'est donc bien une étape de traitement cruciale puisque justement concernée par la transition entre processus centraux et périphériques. Il est ainsi raisonnable de penser qu'une augmentation de la « charge cognitive » dans le buffer graphémique, ici, du nombre de lettres composant le mot peut avoir un certain impact sur le délai de déclenchement du geste d'écriture. Il a bien sûr été montré que la représentation graphémique n'était pas constituée uniquement d'une succession ordonnée graphèmes (e.g. information sur les géminées, structure grapho-syllabique) mais cela ne fait qu'amplifier l'hypothèse intuitive qu'un temps de traitement supplémentaire est nécessaire pour la production de mots plus longs.

Ainsi, dans une conception strictement sérielle (ou sérielle-discrète), une augmentation du nombre de graphèmes à produire devrait se manifester par une augmentation des latences. En effet, si le traitement au niveau d'une étape n'est pas initialisé tant que la sélection n'a pas eu lieu au niveau précédent, l'ensemble des graphèmes composant le mot ne seront activés qu'une fois les procédures lexicales et sous-lexicales achevées, puis l'ensemble des représentations allographiques activées qu'une fois l'ensemble des graphèmes sélectionnés. L'exécution motrice constituerait une étape autonome suivant la sélection des schèmes moteurs

du mot entier. Si au contraire les traitements sont effectués en parallèle (ou en cascade) au niveau central, et que les processus périphériques peuvent être engagés avant la conclusion des étapes précédentes, un effet de la longueur orthographique sur les latences ne sera plus nécessairement observé.

Le travail de Bonin et Méot (2002) visant à identifier les déterminants des latences en production écrite sous dictée avait pourtant rapporté un effet contraire aux attentes (latences plus courtes pour les mots plus longs), mais là encore, ce travail n'utilisait que des mots monosyllabiques. A l'oral, des effets de longueur de mots (donc de la longueur de la représentation phonétique à planifier), comparant des mono- et des bisyllabiques en dénomination d'images, se sont bel et bien manifestés par des latences plus longues pour les mots plus longs (Meyer et al., 2003). Mais cet effet semble varier selon le contexte expérimental ; il était présent uniquement lorsque les mots courts et longs étaient présentés au sein de blocs séparés.

I.3. Effet de la position de l'irrégularité

Il nous apparaît que la position de la séquence irrégulière ou inconsistante au sein d'un mot irrégulier est une donnée cruciale pour en interpréter les effets sur la dynamique de l'écriture. Ainsi, que ce soit au niveau de la conversion phono-graphémique ou celui de la planification des schèmes moteurs, le traitement de l'information est généralement considéré comme se produisant de manière séquentielle, unité par unité. L'observation des effets de la position de la séquence irrégulière peut donc nous renseigner sur l'organisation temporelle des processus sous-jacents. Cela peut par exemple se manifester en lecture à l'oral par un coût de l'irrégularité sur les latences qui diminue graduellement au fur et à mesure que l'irrégularité est proche de la finale du mot (Coltheart & Rastle, 1994). De la même manière à l'écrit, toujours en utilisant des monosyllabiques, Bonin et al. (2001b) ont d'abord montré que seule une inconsistance initiale affectait les latences en dénomination écrite d'images (s'agissant uniquement de monosyllabiques, l'inconsistance était située sur l'attaque ou la première voyelle). Mais l'effet d'une inconsistance finale était ensuite bien présente en écriture sous dictée. Selon ces auteurs, ce résultat en dictée s'oppose à l'hypothèse selon laquelle l'écriture débute dès que la première lettre est encodée. L'absence d'effet en dénomination, montrant au contraire une résolution de l'irrégularité après le début de la production, proviendrait du fait que les activations sémantiques permettent la récupération de la représentation orthographique de manière très rapide ; un processus qui interviendrait avant que la procédure de conversion phono-graphémique n'ait atteint la fin du mot. Bien qu'ils n'aient eux pas rapporté d'effet sur les

latences de la présence d'une irrégularité dans une tâche de copie, Roux et al. (2013) ont montré que la durée d'écriture de chaque lettre était modulée par la position de cette irrégularité. Une irrégularité au début du mot serait résolue (ou le coût du conflit central se répercuterait) au moment de la production de la première lettre, alors que l'effet serait plus diffus (tout au long de l'écriture du mot) lorsque l'irrégularité est à la fin du mot. Des effets différents de la position de l'irrégularité ou de l'inconsistance, sur les latences ou sur les durées de production ont donc été rapportés au travers de tâches d'écriture sous dictée, de dénomination écrite ou de copie mais ceux-ci semblent plutôt plaider en faveur de la conception en cascade.

Quoi qu'il en soit, ces résultats démontrent une certaine séquentialité dans la procédure de conversion (qui génère un conflit en cas d'irrégularité) et renforce selon nous la nécessité de prendre en compte la position de la séquence irrégulière lorsque l'on s'intéresse à ses effets sur le comportement. Les calculs de régularité proposés Soum (1997) (basés sur la somme des fréquences des mots contenant une relation phonie-graphie donnée), nous fournissant des mesures distinctes sur les positions *initiale*, *interne* et *finale*, pourront nous être utiles à cette fin. Comme précédemment, si les mesures de consistance de la base de données LEXOP fournissent des mesures de consistances détaillées pour toutes les composantes du mot (i.e. attaque, rime, coda), elles ne nous semblent pas compatibles avec un travail utilisant des mots de plusieurs syllabes. Lorsque nos propres mesures de consistances seront mises en œuvre, la position de la séquence considérée sera une dimension à prendre en compte.

II. NEUROANATOMIE DES PROCESSUS CENTRAUX ET PERIPHERIQUES DE L'ECRITURE

II.1. Etudier le réseau cérébral de l'écriture en neuroimagerie

On dispose aujourd'hui d'un certain nombre de travaux réalisés en neuroimagerie de l'écriture manuscrite qui, bien qu'ils restent rares par comparaison à d'autres modalités langagières, devraient permettre de tirer un certain bilan. Différentes approches méthodologique ont pu être utilisées dans le but d'identifier ce que les chercheurs peuvent parfois désigner comme les « centres de l'écriture » chez le sujet sain. Ces « centres » peuvent désigner de manière générale un socle commun de processus parmi la diversité des processus engagés dans les différentes tâches d'écriture ; celles-ci pouvant varier selon l'entrée (entrée auditive dans une tâche d'écriture sous dictée, visuelle dans une tâche de dénomination écrite d'images, ou de copie de mots lus, conceptuelle dans l'écriture spontanée ou la génération sémantique), selon la sortie (réel tracé sur une feuille avec un stylo, écriture avec le doigt dans

les aires, écriture tapée sur clavier d'ordinateur, voire écriture « imaginée »), ou selon le contenu du message (lettres, mots, phrases, textes développés ; mots rares/fréquents, réguliers/irréguliers, pseudo-mots, etc.). Il est ainsi courant dans les expérimentations d'utiliser deux types de tâches contrôles : une tâche visant à contrôler les processus d'entrée, que l'on pourra qualifier par extension de processus centraux, et une tâche visant à contrôler les processus moteurs de sortie, qualifiés par extension de processus périphériques (quoique, on l'a vu, la dénomination « processus périphériques » désigne davantage dans les modèles cognitifs de l'écriture que la simple exécution motrice).

L'ambition du présent travail est donc d'apporter une contribution au débat sur la localisation anatomique et fonctionnelle de tels « centres de l'écriture », et en particulier d'examiner la distinction, au sein du réseau cérébral de l'écriture manuscrite, entre des aires fonctionnelles associées au traitement central, linguistique, de l'entrée, et des aires plutôt associées au contrôle moteur, périphérique, de la sortie. Les travaux mis en œuvre incluront un travail de synthèse, quantifiée, des travaux publiés jusqu'à présent (Chapitre VI), ainsi que la conduction de deux expérimentations utilisant l'IRM fonctionnelle (Chapitres VII et VIII).

Il s'agira notamment de confirmer l'implication et de préciser le rôle d'un certain nombre d'aires corticales que différentes études antérieures, qu'elles soient neuropsychologiques (au travers de l'étude des agraphies), en neuroimagerie, ou en stimulation corticale directe, ont d'ores et déjà mis en évidence : le cortex moteur et sensori-moteur, l'aire motrice supplémentaire, le cervelet, le cortex temporo-occipital inférieur gauche (impliqué dans l'agraphie lexicale, parfois rapporté activé en neuroimagerie lors de l'écriture de mots), les régions frontales inférieures et temporales supérieures (impliquées dans l'agraphie phonologiques, rapportées activées en neuroimagerie tantôt en lien avec la voie phonologique, tantôt avec la voie lexicale), la région pariétale inférieure (un centre de l'écriture a été identifié dans le gyrus angulaire, des perturbations phonologiques seraient causées par la stimulation électrique du gyrus supramarginal), et, tout particulièrement, deux aires qui apparaissent régulièrement activées (et associées à l'agraphie pure), que sont la région pariétale supérieure gauche et frontale supérieure gauche (GMFA). Afin de faire progresser notre compréhension sur le rôle fonctionnel de ces différentes aires, nous chercherons de plus à examiner des effets de longueur orthographique (indices du recrutement du buffer graphémique) et des effets de l'âge d'acquisition des mots produits (proposés comme indices de l'accès lexico-orthographique, mais distincts des effets de fréquence lexicale, cf. Chapitre I.II.2.2).

II.2. Rôle de la GMFA dans l'écriture : à l'interface des processus centraux et périphériques ?

Plusieurs travaux récents suggèrent qu'une aire située aux alentours de la partie postérieure du sillon frontal supérieur jouerait un rôle crucial dans la production écrite (Katanoda et al., 2001; Roux et al., 2009; Sugihara et al., 2006). Ce rôle devrait ainsi se traduire par une activation qui persiste quelle que soit la tâche contrôlée, motrice ou linguistique, utilisée. Cette aire, dénommée GMFA par Roux et al. (2009), aurait en effet un rôle situé à l'interface entre les processus centraux et les processus périphériques ; dans la transformation du code orthographique ou graphémique abstrait en commandes motrices spécifiques. On peut ainsi suggérer qu'un tel rôle implique un stockage temporaire de la représentation orthographique dans une mémoire de travail : le buffer graphémique. Ce composant crucial des modèles cognitifs de la production écrite étant sensible au nombre de lettres à produire (Caramazza et al., 1987; Hillis & Caramazza, 1989), on peut émettre l'hypothèse que des activations sensibles à la longueur des mots dans le réseau cérébral de l'écriture puissent révéler la GMFA (cette hypothèse semble avoir été récemment validée par Rapp et Dufor (2011)).

Pourtant, bien qu'une aire soit activée en neuroimagerie fonctionnelle dans une tâche donnée, son implication n'est pas *nécessairement indispensable* à la bonne réalisation de cette tâche ; seul l'effet de sa lésion peut vraiment nous renseigner sur ce point (Price, Mummery, Moore, Frakowiak, & Friston, 1999). Le rôle crucial, ou nécessaire, du cortex frontal dans l'écriture est ainsi appuyé par les travaux de neuropsychologie détaillant les symptômes agrapiques découlant de sa lésion. Des lésions dans l'« aire d'Exner » (partie postérieure du gyrus frontal moyen) peuvent induire des cas d'agraphie pure linguistique avec des erreurs linguistiques restreintes à la modalité écrite, mais préservation de la forme du tracé des lettres (Roeltgen, 2003), ou au contraire des cas d'agraphie pure apraxique entraînant une incapacité à tracer des lettres (Anderson et al., 1990; Hodges, 1991). La contribution de cette région frontale est ainsi souvent définie comme cruciale pour l'écriture (bien que la controverse existe), mais son véritable rôle fonctionnel reste obscur. Cette incertitude tient peut-être en partie à l'incertitude de la localisation de l'aire en question, mais aussi aux limites inhérentes aux études lésionnelles que l'on a évoquées plus haut : associations symptôme-lésion rares, lésions parfois étendues et mal délimitées, effets de la réorganisation fonctionnelle et de la plasticité cérébrale, profil des sujets impliqués (souvent âgés), etc.

Le syndrome de buffer graphémique est un de ces cas particuliers d'agraphie pouvant découler de lésions frontales. Il est défini, on l'a vu, comme un trouble de l'écriture entraînant des erreurs orthographiques dont le nombre augmente avec la longueur des mots à écrire, et ce,

quelle que soit la modalité (écriture manuscrite ou sur clavier, épellation), quelle que soit la tâche (écriture spontanée, sous dictée, etc.), quelle que soit la régularité orthographique ou la fréquence lexicale des mots écrits (Caramazza et al., 1987). Les données lésionnelles issues de l'étude de ce syndrome ne permettent pas encore de confirmer l'hypothèse d'un siège frontal du buffer graphémique très localisé comme le suggèrent les données de neuroimagerie de Rapp et Dufor (2011). Les lésions rapportées sont ainsi souvent frontales ou pariétales gauche (Hillis & Caramazza, 1989; Miceli & Silveri, 1985; Posteraro et al., 1988) mais parfois aussi dans l'hémisphère droit ou dans des régions sous-corticales (Hillis & Caramazza, 1989; Roeltgen, 2003). Le travail de « superposition » des lésions de plusieurs patients réalisé par Cloutman et al. (2009) a tout de même bien démontré le rôle cruciale de régions aux alentours des gyrus postcentral et précentral, dont il se pourrait que la GMFA fasse partie.

Nous souhaitons donc ici d'abord confirmer l'implication centrale de la GMFA dans l'écriture manuscrite par le biais de la neuroimagerie (IRMf). Puis nous tenterons d'apporter une meilleure compréhension de son véritable rôle fonctionnel chez le sujet sain par l'utilisation d'une technique de neuromodulation cérébrale : la stimulation magnétique transcrânienne (TMS) (Chapitre IX). Contrairement aux études lésionnelles, permettant rarement d'obtenir un lien aire cérébrale – fonction cognitive fiable, la TMS permet de causer des perturbations temporaires avec une grande précision anatomique. Pour atteindre cette précision, l'IRMf devra ainsi aussi permettre la localisation précise de la GMFA, individuellement chez chaque participant.

II.3. Rôle du cortex pariétal supérieur dans l'écriture

La région du cortex pariétal supérieur gauche, que l'on peut globalement situer aux alentours du sillon intrapariétal, incluant le lobule pariétal supérieur et, selon les cas le gyrus postcentral et le lobule pariétal inférieur, est le site lésionnel principal de l'agraphie apraxique (Alexander et al., 1992a; Auerbach & Alexander, 1981; Otsuki et al., 1999). On a ainsi souvent associé sa contribution dans l'écriture à un rôle périphérique, à la fois moteur et visuo-kinesthésique ; l'écriture de ces patients est difficile, lente et déformée. Selon une hypothèse, le cortex pariétal supérieur serait une zone de stockage des représentations graphomotrices des lettres, des engrammes moteurs.

Des activations de cette région pariétale lors de l'écriture ont été rapportées de manière répétée depuis les premiers travaux de neuroimagerie. La précision anatomique des résultats rapportés est pourtant parfois insuffisante et, nous le verrons, il est difficile de faire la part des choses entre des activations du lobule pariétal supérieur et des activations de sa contrepartie inférieure, incluant le gyrus angulaire et le gyrus supramarginal, ou d'activations purement

sensori-motrices du gyrus postcentral. Il est en effet vraisemblable que différentes aires de cette région pariétale postérieure hétérogène soient impliquées à différents niveaux dans le processus d'écriture. Comme cela était le cas pour la GMFA, plusieurs études d'imagerie ont attribué un rôle crucial dans l'écriture de cette aire ; par exemple le travail de Sugihara et al. (2006) ayant utilisé une conjonction de contrastes impliquant l'écriture avec la main droite et avec la main gauche. Il s'avère pourtant que le cortex pariétal puisse tout à fait apparaître actif lors de tâches manuelles graphiques n'impliquant pas de produire des lettres. Plusieurs travaux s'intéressant aux mouvements dirigés, visant à atteindre ou attraper un objet, révèlent en effet l'importance du lobule pariétal supérieur, voire précisément de la partie antérieure du sillon intrapariétal, dans ce type de mouvements manuels (e.g. Glover, Miall, & Rushworth, 2005; Martin, Jacobs, & Frey, 2011; Tunik, Ortigue, Adamovich, & Grafton, 2008).

Deux travaux récents ont selon nous conduit à envisager une réalité plus complexe quant au rôle fonctionnel de cette aire dans l'écriture. En montrant qu'une stimulation corticale de cette région restreinte du lobule pariétal supérieur pouvait, en plus des perturbations périphériques attendues, provoquer des erreurs plus centrales d'inversion, de substitution de lettres, jusqu'à des erreurs lexicales (mot remplacé par un autre), Magrassi et al. (2010) nous amènent à reconsidérer l'idée d'un rôle uniquement périphérique. L'examen de la connectivité fonctionnelle de la portion antérieure du lobule pariétal supérieur (aire PE) suggère en outre une implication qui varie selon les demandes linguistiques de la tâche réalisée (Segal & Petrides, 2012). Cette aire était en effet la seule région pariétale toujours activée au travers des différentes tâches d'écriture employées dans cette expérimentation (dénomination écrite d'image, copie de mots), quelle que soit la tâche contrôle utilisée dans le contraste (traçage de boucles et dénomination subvocale, lecture). L'interaction fonctionnelle avec le gyrus angulaire apparaissait augmenter lorsque le mot devait être écrit à partir d'un mot lu (i.e. copie) mais augmentait avec le gyrus supramarginal lorsque le mot devait être écrit à partir d'une image. On peut ainsi en déduire un rôle indispensable pour l'écriture de contrôle moteur de haut-niveau, d'une interface permettant la coordination entre les aires du langage et les régions motrices (ce qui est par ailleurs appuyé par l'existence de connexions anatomiques bidirectionnelles entre cette aire et le cortex moteur et prémoteur ; Petrides & Pandya, 1984).

Ces différents résultats, récents, nécessitent d'être reproduits et développés pour préciser le rôle linguistique de cette aire : a-t-elle un rôle purement périphérique ou intervient-elle au niveau central ? Là encore, après avoir confirmé son implication, puis localisé sa position par le biais d'expérimentations en IRMf, nous escomptons montrer par l'utilisation de la TMS que cette aire a bien un rôle dans la production écrite chez le sujet sain, et de préciser celui-ci en le distinguant de celui de la GMFA (Chapitre IX).

SECONDE PARTIE



DONNEES
EXPERIMENTALES

CHAPITRE IV : METHODES ET OUTILS D'INVESTIGATION

I. L'IMAGERIE PAR RESONANCE MAGNETIQUE (IRM)

I.1. La résonance magnétique nucléaire

L'IRM est une technique d'imagerie qui permet de produire des images de grande qualité de l'intérieur du corps humain, et du cerveau en particulier de manière totalement inoffensive. Elle est basée sur les principes de la résonance magnétique nucléaire (RMN) des atomes d'hydrogène composant les tissus (les molécules d'eau en particulier représentent 80% du poids du cerveau). Ainsi lorsque l'on place un sujet dans un champ magnétique de forte intensité (dit B_0), généré par la bobine de l'appareil IRM (et mesuré en teslas ; T), les spins (ou moments magnétiques) des atomes d'hydrogènes s'orientent dans la direction du champ (ou dans la direction opposée) ; c'est la phase d'aimantation. Afin d'être en mesure de mesurer cette aimantation en chaque point du cerveau (très faible par rapport au champ B_0), on applique un champ magnétique perpendiculaire à B_0 , B_1 , à l'aide d'une antenne radiofréquence (RF) disposée autour de la tête du sujet ; phase de résonance. Une fois le champ B_1 coupé, la direction des spins qui avait basculé avec un certain angle dans la direction de B_1 va progressivement retourner vers la direction d'origine ; c'est le phénomène de relaxation. C'est le signal issu de cette phase de relaxation qui permettra de mesurer l'aimantation de l'eau et des tissus. La valeur des temps de relaxation caractérisées par les constantes T_1 (temps de relaxation « longitudinal », retour dans l'alignement de B_0) ou T_2 (ou T_2^* ; temps de relaxation « transversal », lié à un phénomène de déphasage de la fréquence de résonance des spins, en présence par exemple d'agents paramagnétiques) varie suivant la nature des tissus et va donc permettre d'obtenir différents types d'images.

I.2. Le signal BOLD

Tout comme d'autres techniques de neuroimagerie fonctionnelle comme la tomographie par émission de positons, le signal BOLD (pour *blood oxygenation level-dependant*) utilisé dans l'IRM fonctionnelle (IRMf) est basé sur des réponses physiologiques reliées aux activations cérébrales. Il s'appuie sur les différentes propriétés magnétiques du sang désoxygéné par

rapport au sang oxygéné (l'hémoglobine désoxygénée est fortement paramagnétique). En effet, lors de l'augmentation de l'activité neuronale (variations de l'ordre de la dizaine de millisecondes), des afflux sanguins localisés entraînent une augmentation de l'oxygénation du sang (et une dilatation des vaisseaux), ce qui affecte la résonance magnétique (avec un temps de réponse se comptant cette fois en plusieurs secondes) (voir Figure IV-1). C'est en particulier la concentration de désoxy-hémoglobine qui modifie la valeur locale du temps de relaxation T_2 ou T_2^* . Le recueil de ce signal sur l'ensemble du cerveau peut être réalisé en environ 1s (voire moins), ce qui est une résolution temporelle bien supérieure à la TEP, basée sur la désintégration d'un produit radioactif injecté (~30 secondes).



Figure IV-1 : Augmentation du taux d'oxyhémoglobine lors de l'activité neuronale à la base du signal BOLD (d'après Huettel, Song, & McCarthy, 2004)

I.3. Les protocoles expérimentaux en IRMf

Les expérimentations utilisant la technique d'IRMf consistent à recueillir un signal (BOLD), qui découle des changements dans l'activité neuronale mais qui ne s'y substitue pas, au travers de différentes tâches ou conditions (impliquant ou non un processus cognitif particulier). Deux méthodes sont généralement utilisées pour acquérir ces données. Un paradigme dit « en blocs » comporte une alternance de plusieurs conditions, réalisées pendant quelques dizaines de secondes, et lors desquelles des stimuli sont présentés et/ou des réponses sont attendues des sujets de manière répétée. Les variations du signal hémodynamique découpé en petites unités à l'intérieur du volume cérébral (les voxels, représentant simplement les pixels volumétriques de l'image BOLD) vont être mises en relation avec cette alternance de conditions par le biais d'une analyse statistique. Cette approche, alternant généralement des conditions « d'activation » et des conditions « contrôle » ou de repos, permet notamment à la réponse hémodynamique d'atteindre son maximum puis de redescendre à son niveau de base. Il en résulte un rapport signal sur bruit optimal, en particulier dans le cas de contrastes « soustractifs » (« activation » vs. « contrôle ») via des tests T.

La méthode d'acquisition « événementielle » (voir Figure IV-2) implique elle une alternance rapide des stimuli ou des essais selon un ordre de présentation généralement

aléatoire. Les réponses hémodynamiques sont reconstruites de manière unitaire, non plus par blocs de stimuli. Cela permet donc notamment de réduire l'effet d'habituation qui peut survenir lors d'une présentation en blocs et permet une plus grande flexibilité dans la construction du schéma expérimental. Cependant il sera nécessaire d'augmenter le nombre de répétitions de chaque essai ou stimulus pour obtenir un rapport signal sur bruit satisfaisant.

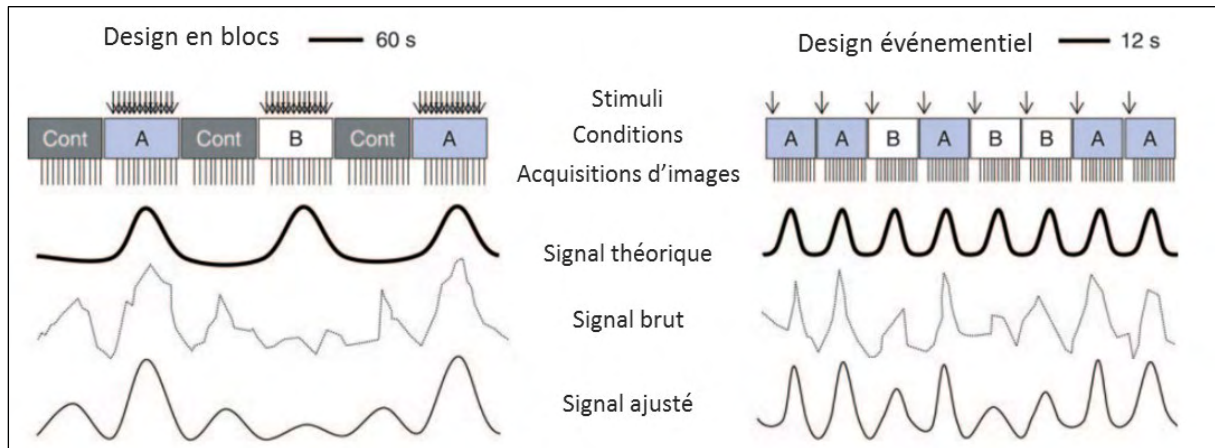


Figure IV-2 : Protocoles de neuroimagerie « en blocs » et « événementiel ». Alternance d'une condition A, d'une condition contrôle et d'une condition B, comportant chacune la répétition de stimuli, dans le protocole en blocs (à gauche). Les voxels activés correspondent aux parties de l'image dans lesquelles les variations de signal suivent le signal théorique construit à partir de l'alternance des blocs. Mélange des différentes conditions expérimentales dans le protocole événementiel (à droite). La réponse hémodynamique est échantillonnée entièrement après chaque stimulus (adapté de Démonet et al., 2005).

II. LA STIMULATION MAGNETIQUE TRANSCRANIENNE (TMS)

L'essor des neurosciences cognitives est en grande partie dû au développement des techniques de neuroimagerie, ayant pour principal objet la mise en relation des signaux recueillis (comme le signal BOLD) avec certains processus cognitifs d'intérêt. Ces corrélations entre une activité cérébrale et un comportement n'impliquent pourtant pas que l'aire activée est *nécessaire* pour un comportement donné, d'où la pertinence, encore aujourd'hui, du modèle lésionnel utilisé en neuropsychologie (voir Price et al., 1999). Ce champ d'étude, consistant à étudier les effets d'une lésion cérébrale sur un comportement particulier comporte pourtant plusieurs limites liées en particulier à la variabilité des lésions (en étendue, en localisation) ou aux phénomènes de plasticité cérébrale et de récupération (par exemple, le rôle de l'hémisphère droit dans la récupération de l'aphasie). La stimulation magnétique transcrânienne (ou TMS pour *Transcranial Magnetic Stimulation*) est un outil de plus en plus utilisé aujourd'hui dans le champ des neurosciences cognitives et qui permet notamment de provoquer chez le sujet sain des « lésions virtuelles » transitoires et de manière non invasive (Pascual-Leone, 1999; Pascual-Leone, Walsh, & Rothwell, 2000), et ainsi de tester des hypothèses sur le caractère « essentiel » de l'activité d'une aire cérébrale sur un comportement donné.

II.1. Principes de base

La TMS est basée sur le principe de l'induction électromagnétique découvert par Michael Faraday. Lorsqu'un courant électrique est envoyé au travers d'une bobine, il génère un champ magnétique qui pourra induire un courant électrique dans un conducteur proche. Depuis les premiers travaux du début du XX^{ème} siècle, il a ainsi été montré que des courants de suffisamment forte d'intensité et de durée suffisamment courte pouvaient générer des impulsions magnétiques qui pénètrent le scalp et le crâne avec un minimum d'atténuation, permettant ainsi de stimuler le cerveau sans douleur. Le principe de l'induction magnétique appliqué par la TMS pour induire la stimulation du cortex est résumé dans la Figure IV-3 ci-après. Le type de bobine TMS utilisée de manière classique est une bobine en forme de huit dans laquelle le courant circule dans une direction opposée dans chaque boucle et s'additionne au niveau du point central. Cela permet de cibler une région précise du tissu cortical, avec une résolution effective qui peut être de quelques millimètres (O'Shea & Walsh, 2007). Bien que les mécanismes d'action précis demeurent incertains, on considère que la TMS active les axones des neurones du cortex plutôt que les corps cellulaires. Etant donné le déclin rapide de la force du champ magnétique avec la distance (généralement de 2 à 2,5 T), on considère que l'application de la TMS est limitée à des aires situées à 2-3 cm de profondeur par rapport à la surface du crâne (Sandrini, Umiltà, & Rusconi, 2011).

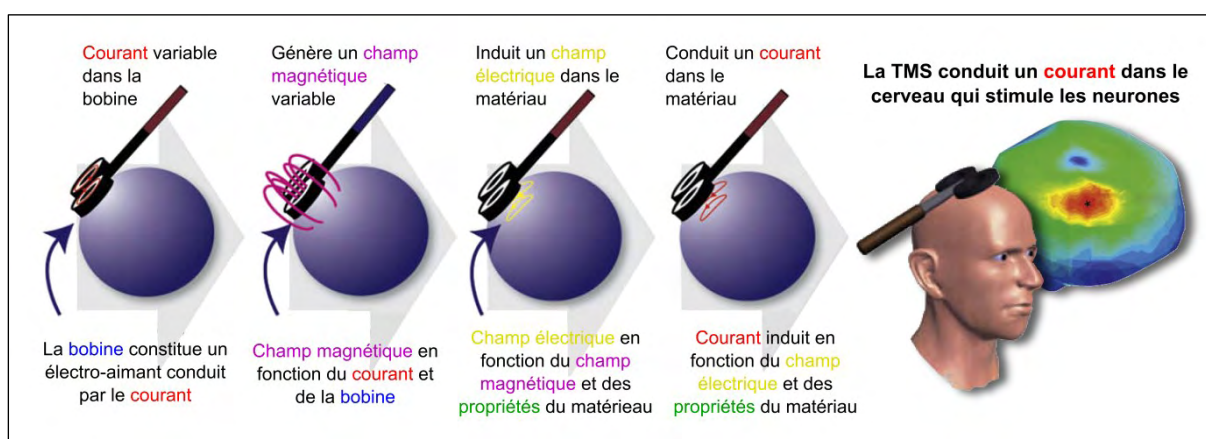


Figure IV-3 : Principe de l'induction électromagnétique à l'œuvre dans la TMS (adapté de Wagner, Rushmore, Eden, & Valero-Cabre, 2009).

II.2. Effets de la TMS

Dans les 20 à 30 dernières années, la TMS a été utilisée pour stimuler des nerfs périphériques et le cerveau dans une grande variété d'études, s'intéressant à la motricité, l'attention, la vision, la mémoire, ou encore le langage. Les impulsions TMS peuvent être appliquées à des intensités diverses et sous la forme d'impulsions individuelles (*single pulse*) ou de séries d'impulsions (TMS répétitive ou rTMS) de haute ou de basse fréquence. Une impulsion TMS individuelle appliquée sur le cortex moteur primaire pourra produire une contraction subite d'un muscle de la main, quand une impulsion sur le cortex visuel pourra entraîner la vision d'un bref flash lumineux (un phosphène). Mais selon les paramètres de stimulation choisis, les effets seront soit inhibiteurs, soit excitateurs (Chen et al., 1997; Wassermann, 1998). Une stimulation répétitive de basse fréquence, à 1 Hz, va par exemple avoir pour effets une diminution de l'excitabilité corticale pendant une certaine durée (généralement équivalente à la durée de la stimulation). La mesure de l'excitabilité corticale peut par exemple s'établir en enregistrant les potentiels évoqués moteurs au niveau d'un muscle de la main pendant une stimulation du cortex moteur primaire. Une stimulation répétitive de plus haute fréquence (supérieure à 10 Hz) aura au contraire pour effet une augmentation de l'excitabilité corticale. Une stimulation procédant par courts trains répétés de haute fréquence (50 Hz) (on parle de stimulation *theta burst*) se traduira, elle, par une diminution de l'activité corticale. On distinguera les protocoles de stimulation dits *online*, lors desquels la stimulation a lieu pendant la réalisation d'une tâche par le sujet (e.g. impulsion déclenchée sur le cortex visuel 100 ms après la présentation d'un stimulus visuel), des protocoles *offline*, où la stimulation, qui a lieu de manière passive pendant une durée déterminée, est suivie d'une phase de réalisation de tâches comportementales. Bien que la simple dichotomie entre effets excitateurs ou inhibiteurs masque en fait une réalité plus complexe (voir par exemple Siebner, Hartwigsen, Kassuba, & Rothwell, 2009), la TMS a souvent été utilisée avec succès chez le sujet sain en tant qu'outil pour créer des « lésions virtuelles », en perturbant temporairement l'activité cérébrale. Par exemple, une stimulation du cortex pariétal droit peut induire de manière temporaire un comportement semblable à la négligence spatiale unilatérale (Fierro et al., 2000), une stimulation du cortex visuel peut perturber les capacités d'imagerie visuelle mentale (Kosslyn et al., 1999). Il faut néanmoins noter qu'une stimulation *offline* inhibitrice peut parfois améliorer plutôt que dégrader un comportement (e.g. Andoh et al., 2006; Hilgetag, Theoret, & Pascual-Leone, 2001). Comme nous l'avons vu précédemment (cf. Chapitre II.IV.2), la TMS a aussi été utilisée avec succès pour étudier le rôle de certaines régions comme l'aire de Broca dans les fonctions langagières. Ses effets potentiels sur une compétence à la fois linguistique et motrice comme l'écriture sont encore mal connus car les études sont rares.

II.3. Détermination de la cible et guidage

Un des points les plus cruciaux pour la bonne conduite d'une expérimentation utilisant la TMS est la localisation de la cible de la stimulation. Si certaines études, ciblant en particulier le cortex moteur, disposent d'un moyen direct de déterminer la position de la bobine sur la zone souhaitée, en enregistrant les potentiels évoqués moteurs ou en repérant directement les contractions motrices générées par une impulsion TMS, les travaux s'intéressant à des fonctions cognitives de plus haut niveau comme le langage requièrent généralement un système de neuronavigation stéréotaxique. Ce type de système est composé d'un ensemble de capteurs réfléchissants, disposés en particulier sur la bobine TMS et autour du scalp du sujet, et d'une caméra infrarouge reliée à un ordinateur. Une image anatomique 3D du participant acquise lors d'un examen d'IRM (incluant le cerveau et la surface du scalp) peut ainsi être visualisée sur l'écran de l'ordinateur et ainsi guider le positionnement de la bobine sur le scalp avec une grande précision. L'anatomie du cortex cérébral peut ainsi être utilisée pour localiser la cible souhaitée ; frontières anatomiques (gyrus, sillons), aires de Brodmann, coordonnées de Talairach, etc. Pourtant cette stratégie, efficace dans bien des cas, présente certaines limites. Toutes les aires fonctionnelles ne correspondent pas à des marqueurs anatomiques précis et d'importantes variations anatomiques interindividuelles peuvent exister (e.g. Rademacher et al., 2001), c'est pourquoi le guidage utilisant des données d'IRM fonctionnelle est souvent la solution la plus fiable et efficace (Sack et al., 2009; Sparing, Buelte, Meister, Paus, & Fink, 2008). En effet, cette méthode permet de définir la cible de la stimulation au niveau individuel en fonction d'une activation liée à un processus cognitif particulier. Elle permet ainsi de pallier une autre limite importante de l'approche simplement anatomique qu'est la variabilité anatomo-fonctionnelle interindividuelle pour un même processus cognitif.

III. ANALYSE DES DONNEES COMPORTEMENTALES EN PSYCHOLINGUISTIQUE

III.1. Les temps de réaction

L'un des champs d'étude de la psycholinguistique est l'étude des processus cognitifs qui sous-tendent le traitement des mots. Comme dans le reste des sciences cognitives en général, les expérimentations ont souvent pour but de mettre en évidence l'effet d'une variable sur le comportement. Les temps de réactions (ou latences, ou temps de réponses), correspondant au délai entre la présentation d'un stimulus et la réponse (pression sur un bouton, prononciation

orale, etc.), sont ainsi largement utilisés, par le biais des statistiques, pour tester des hypothèses sur le fonctionnement cognitif sous-jacent. Les analyses statistiques « standard » utilisées en psycholinguistique, le plus souvent des analyses de variances basées sur des temps de réaction moyens, sont pourtant parfois critiquées aujourd'hui en faveur de méthodes statistiques qui prennent mieux en compte la variabilité intra et interindividuelle (voir Baayen, 2004).

Les analyses de régression ou les analyses de variances (ANOVA) classiques se basent sur l'hypothèse de normalité (i.e. les données suivent la loi normale). Pourtant les distributions des temps de réaction sont souvent positivement biaisées, la queue de la distribution est plus longue sur la droite (i.e. il y a davantage de temps de réaction très longs que de temps de réaction très courts). Il peut ainsi être utile de transformer les données, via une transformation logarithmique ou une racine carrée. La transformation la plus efficace pourra cependant dépendre du type de tâche utilisé, et nécessitera une transformation inverse pour pouvoir présenter les données qui ne sont plus sur la même échelle.

Il se pose aussi le problème de l'identification et du rejet des *outliers*, des points de données distants des autres points, aberrants ou extrêmes et qui ne reflètent qu'une erreur de mesure. Baayen et Milin (2010) proposent une méthodologie en plusieurs étapes qui permet de s'affranchir de la méthode classique consistant par exemple à éliminer a priori les points de données qui s'écartent de la moyenne de plus ou moins deux écart-types. En effet, pour le sujet qui nous intéresse, si l'on estime que l'écriture de mots irréguliers génère des temps de latence plus longs que les mots réguliers il est plus probable, étant donné la forme de leur distribution, que les latences « extrêmes » rejetées correspondent aux mots irréguliers, ce qui introduit un biais dans l'analyse (voir notamment Ratcliff, 1993). Dans une première étape, il peut cependant être utile d'éliminer les temps « excessivement courts » ou « excessivement longs » avant l'analyse statistique, dont la définition pourra dépendre du type de données. L'identification des *outliers*, particulièrement dans le cas d'analyses ne nécessitant pas de passer par la constitution de moyennes pour chaque condition (modèles linéaires mixtes, voir ci-après), peut être faite dans une seconde étape a posteriori, en examinant les résidus du modèle calculé (i.e. l'« erreur » non expliquée par le modèle) (Baayen & Milin, 2010). Le rejet des résidus non normaux (e.g. supérieurs ou inférieurs à 2,5 écart-types) peut ainsi permettre d'améliorer la qualité de l'ajustement du modèle statistique en minimisant le rejet de données (voir Figure IV-4).

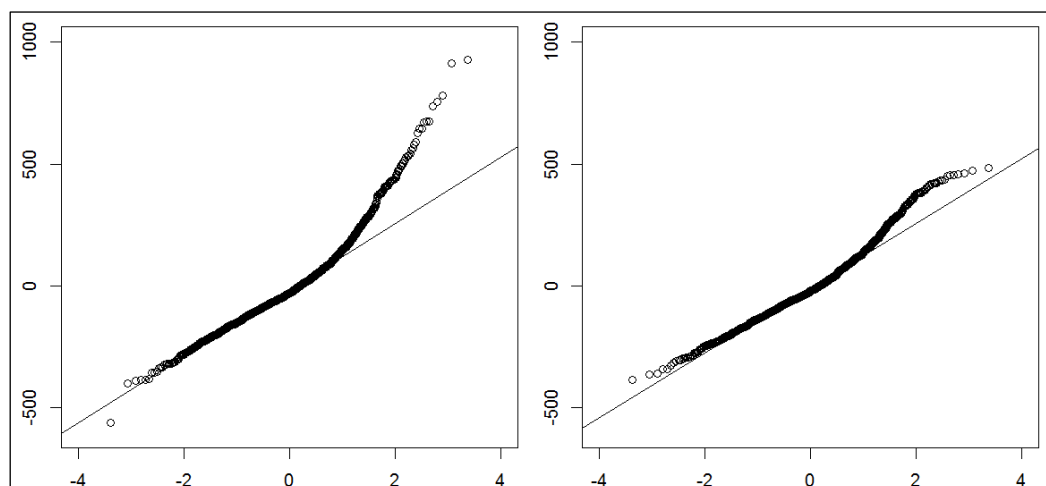


Figure IV-4 : Tracé quantile – quantile vérifiant la normalité des résidus du modèle avant et après la suppression des outliers. L'axe horizontal représente les quantiles de la distribution normale et l'axe vertical les quantiles de la distribution observée des résidus du modèle. Après la suppression des outliers, l'adéquation des résidus à la distribution normale, et donc l'ajustement du modèle aux données, s'est améliorée (données issues de l'analyse des latences présentée dans le Chapitre V.I.3).

III.2. Modèles linéaires mixtes

Dans les études de psycholinguistiques, les participants qui fournissent les données comportementales sont considérés comme constituant un échantillon sélectionné aléatoirement dans une population ; ils sont modélisés comme une variable aléatoire (dans une ANOVA). En effet, lorsqu'on s'intéresse aux latences (ou temps de réaction), certains participants tendent à être rapides quand d'autres tendent à être plus lents (indépendamment des facteurs d'intérêt). De même, les stimuli linguistiques utilisés (le plus souvent des mots), ne représentent qu'une sélection et une multitude de facteurs que l'on ne peut contrôler entièrement peuvent pourtant affecter les temps de réactions (e.g. fréquence lexicale, concrétude, complexité phonologique, etc.). Des mots présentant certaines caractéristiques sont sélectionnés mais ils n'englobent pas l'ensemble des mots de la langue présentant cette caractéristique, il faut donc aussi traiter les mots comme un effet aléatoire et donc prendre en compte leur variabilité. Ainsi, notamment suite aux critiques émises dès 1973 par Herbert Clark (1973), deux types de résultats d'ANOVA sont ainsi souvent présentés dans les publications ; une ANOVA *par items* et une ANOVA *par sujets* (en mesures répétées). Pourtant des résultats significatifs à ces deux analyses n'impliqueraient pas nécessairement que les effets soient généralisables à la fois à l'ensemble de la population et à l'ensemble des items.

Les modèles linéaires à effets mixtes, avec effets aléatoires croisés pour les sujets et les items (ou plus simplement, modèles mixtes) ont donc été développés pour pallier ces difficultés, en permettant de combiner les deux types d'effets aléatoires (Baayen, Davidson, & Bates, 2008).

Dans ce type de modèles, semblables à des régressions multiples, on distinguera les effets fixes : des facteurs à plusieurs niveaux, dont le nombre de niveau est fixe, et définis sous la forme de contrastes (e.g. mots de la catégorie « réguliers » vs. « irréguliers »); des effets aléatoires « Sujets » et « Items » : les sujets ou les stimuli sont considérés comme prélevés au hasard parmi la population des sujets ou des stimuli, ils sont modélisés comme des variables aléatoires avec une moyenne de zéro et une variance inconnue (i.e. les données « individuelles » sont ajustées autour de zéro). De plus, les modèles mixtes sont plus flexibles que des ANOVAs classiques dans le sens ils ne nécessitent pas de faire des moyennes a priori et l'on peut donc facilement y inclure des variables continues, afin d'examiner leur contribution ou de les « contrôler » (e.g. propriétés des stimuli, des sujets, numéro de l'essai pour par exemple contrôler l'augmentation ou la diminution des latences avec la fatigue, etc.). Ils ne nécessitent pas non plus que les données soient parfaitement équilibrées au sein des facteurs (e.g. dans le cas d'essais échoués). Ce type de modèle, dont l'usage se développe actuellement en psycholinguistique présente donc d'importants avantages par rapport aux analyses plus classiques, tout en permettant aux chercheurs de considérer tout un ensemble de facteurs pouvant expliquer les données, qu'ils soient liés aux stimuli (e.g. fréquence lexicale, nombre de lettres) ou aux participants (e.g. âge, sexe).

CHAPITRE V : ORGANISATION TEMPORELLE DES PROCESSUS COGNITIFS DE L'ECRIURE - APPROCHE PSYCHOLINGUISTIQUE

I. EXPERIMENTATION PRELIMINAIRE : EFFETS DE REGULARITE EN ECRITURE DE MOTS SOUS DICTEE

I.1. Introduction

Afin de mettre en évidence une conception en cascade de la production verbale écrite, Delattre et al. (2006) avaient utilisé la notion de consistance en écriture sous dictée de monosyllabes. Les auteurs ont ainsi montré que les étapes centrales impliquées dans la production de mots (e.g. récupération de la représentation graphémique du mot à écrire) n'étaient pas entièrement résolues lorsque le participant commençait à écrire. Ce résultat, principalement caractérisé par une augmentation de la durée d'écriture et une augmentation des latences en présence d'un mot inconsistant, s'oppose ainsi à la proposition d'une planification totale de la réponse avant son initialisation, telle qu'avancée par Damian et Stadthagen-Gonzalez (2009). Dans le but de reproduire et de développer le résultat de Delattre et al. (2006), nous avons souhaité introduire deux notions qui nous paraissent importantes à considérer : la longueur orthographique des mots et la position de l'irrégularité dans le mot. La longueur des mots (nous prenons en compte ici le nombre de syllabes et de lettres) est ainsi susceptible de moduler le degré de planification, et, de par le fonctionnement séquentiel, de gauche à droite, de la voie de conversion phonème-graphème (à la base de l'effet de régularité), interagir avec la position, début ou fin, de l'irrégularité dans le mot. Par ailleurs, contrairement à ce qui a été réalisé jusqu'à présent, nous avons ici souhaité introduire des mesures de la vitesse moyenne d'écriture par mot plutôt que de la durée d'écriture, la vitesse nous apparaissant mieux à même de prendre en compte des variables difficilement contrôlables telles que les variations de la longueur du tracé au travers de différents mots.

Une des principales limites de l'approche expérimentale récente de la consistance en français, en particulier lorsque l'on souhaite étudier la combinaison d'effets de longueur orthographique, de régularité et de position de l'irrégularité, est selon nous qu'elle se base le

plus souvent sur des travaux utilisant uniquement des mots monosyllabiques. Le présent travail a donc été l'occasion de tester chez l'adulte la conception de la régularité orthographique concurrente développée par Lecours (1996) et Soum (1997) qui présente plusieurs avantages parmi lesquels l'utilisation de mots pluri-syllabiques et la prise en compte de la position de l'irrégularité. Le calcul de cette irrégularité y est en outre réalisé sur un échantillon plus représentatif de la langue puisqu'il s'appuie sur l'ensemble des mots de la base BRULEX (Content et al., 1990). L'utilisation de ces données, qui opposent pour un même phonème la graphie préséante (la plus fréquente) à des graphies irrégulières, nous permis de concevoir un matériel utilisant les versions régulières et irrégulières, et ce, à deux positions distinctes dans le mot et dans des mots de longueurs différentes.

Pour résumer, nous souhaitons d'abord tester dans cette étude la conception de la régularité proposée par Lecours (1996) et Soum (1997). Nous postulons une augmentation des latences d'écriture et du nombre d'erreurs dans les mots ainsi définis comme irréguliers. Nous souhaitons explorer les effets conjoints sur la dynamique de l'écriture de la longueur des mots, en utilisant des monosyllabiques et des trisyllabiques, et de la position de l'irrégularité : une « addition » des effets de longueur et de régularité, indépendamment de la position dans le mot celle-ci, sur les latences mais sans que soit affectée la vitesse d'écriture sera le signe d'une encapsulation de l'exécution du geste d'écriture : le geste entier est planifié avant son commencement (conception sérielle). Si la présence de ce « conflit » au niveau central (i.e. irrégularité à résoudre) se répercute au niveau périphérique et se manifeste au contraire par une diminution des vitesses d'écriture, cette conception sera invalidée. Une conception en cascade prédira plutôt une absence d'effet sur les latences d'une irrégularité en position finale, d'autant plus que le mot est long (i.e. le mot entier n'est pas planifié lorsque débute la production), mais un éventuel effet de nature périphérique de celle-ci (sur la vitesse d'écriture).

I.2. Matériel et Méthode

I.2.1. Participants

Vingt-six étudiants de l'Université Toulouse II – Le Mirail, âgés de 19 à 23 ans (moyenne : $20,7 \pm 1,2$) ont participé à cette expérimentation. Tous étaient droitiers, de langue maternelle française, avec une audition et une vision normale ou corrigée. Aucun d'entre eux n'a rapporté de troubles neurologiques ou psychologiques, ni de trouble du langage écrit ou oral.

I.2.2. Stimuli

Les mots utilisés en tant que stimuli auditifs étaient 64 noms monomorphémiques : 32 mots courts, monosyllabiques, avec une longueur moyenne de 4,9 lettres ($\pm 1,0$), et 32 mots longs, trisyllabiques, avec une longueur moyenne de 8,3 lettres ($\pm 0,8$). Ces mots ont été choisis en fonction de la régularité de l'orthographe de leur premier ou de leur dernier phonème (la régularité étant définie comme la correspondance phonème-graphème la plus fréquente dans la position considérée, données issues de (Soum, 1997)). Ces mots étaient appariés de manière à associer chaque mot contenant la forme régulière d'un phonème avec un mot contenant l'une de ses formes irrégulières. Ainsi, le phonème /ɔ/ à l'initiale d'un mot était présent dans sa forme régulière (préséante) dans *orge* et dans une de ses formes irrégulières dans *horde*. De même, le phonème /a/ dans la position finale était régulier dans *tapioca* et irrégulier dans *syndicat*. Autant que possible, nous avons cherché à faire correspondre la structure syllabique et segmentale des mots « réguliers » et « irréguliers », en particulier au niveau de la séquence d'intérêt lors de la constitution des paires. Ainsi, au sein de chaque liste de mots courts et longs, huit paires « réguliers/irréguliers » concernaient le premier phonème (position initiale) et huit paires concernaient le dernier phonème (position finale). La liste des stimuli utilisés est fournie en annexe (Annexe 2.1).

La fréquence lexicale, issue de la base de données LEXIQUE 3.71 (New, Pallier, Brysbaert, & Ferrand, 2004), a été contrôlée au sein de chaque sous-ensemble de mots. Elle était, en unité par million d'occurrences, pour les mots courts de 10,8 pour les irréguliers contre 10,5 millions pour les réguliers, et pour les mots longs de 12,4 pour les irréguliers contre 11,7 pour les réguliers. Les mots de fréquence élevée étaient évités. Les caractéristiques linguistiques de ces items en fonction de leur longueur et leur régularité sont rapportées dans la Table V-1. Les mots courts et longs différaient significativement (test T de Student) au niveau de leur nombre de lettres, de phonèmes, de syllabes, de leur durée acoustique, de leur nombre de voisins ainsi que de leur point d'unicité phonologique (i.e. rang du phonème à partir duquel le mot peut être identifié sans ambiguïté). Conformément à nos attentes, aucune différence significative n'était observée en classant les items selon leur régularité (les mots réguliers et irréguliers étaient correctement appariés sur toutes les caractéristiques considérées incluant le nombre de lettres et la fréquence lexicale).

Table V-1 : Caractéristiques linguistiques des items utilisés dans la tâche d'écriture sous dictée de l'expérimentation préliminaire (n = 64) en fonction de leur longueur puis en fonction de leur régularité (la valeur présentée correspond à la moyenne pour la catégorie). Les valeurs en gras indiquent une différence significative à un test T de Student. *** : p < .0001).

	Courts	Longs	Réguliers	Irréguliers
Nombre de lettres	4,9***	8,3***	6,4	6,8
Nombre de phonèmes	3,5***	6,4***	5,1	4,8
Nombre de syllabes	1***	3***	2	2
Fréquence Films	5,8	8,8	8,0	6,5
Fréquence Livres	9,8	12,1	10,6	11,2
Fréquence de trigrammes (token)	778	996	931	843
Fréquence de trigrammes (type)	1899	2479	2179	2199
Fréquence de bigrammes (token)	6380	7639	6640	7379
Fréquence de bigrammes (type)	18314	21337	18685	20966
Voisins phonologiques	13,4***	1,0***	6,0	8,4
Voisins orthographiques	4,5***	0,3***	3,1	1,7
Point d'unicité phonologique	3,5***	5,7***	4,8	4,4
Durée Acoustique (ms)	546***	677***	626	598

Quatre listes de présentation ont été construites de manière pseudo-aléatoire, dans lesquelles les mots étaient organisés de façon à éviter toute proximité entre la version régulière et irrégulière d'un même phonème. Tous les stimuli étaient prononcés par une locutrice de langue maternelle française avec un accent neutre, dans une cabine d'isolation acoustique à double paroi (<http://petra.univ-tlse2.fr>). Les mots étaient enregistrés à 44.1 kHz/24bit avec un microphone Sennheiser MD 42 (Sennheiser Electronic, Wennebostel, Allemagne), une console de mixage numérique Tascam DM-3200 et un Mac Pro sous Mac OS X (10.5.8).

I.2.3. Dispositif

Le participant était assis face à un ordinateur portable HP EliteBook 8440p (Windows 7, écran 14", 1366*768), à une distance d'environ 60 cm. Les stimuli auditifs étaient présentés via un casque audio Sennheiser HD 280 Pro. Afin de recueillir les temps de réponses, les durées de production et la dynamique du tracé graphique, le participant écrivait sur une tablette graphique Wacom Intuos@3 A4 (Wacom, Krefeld, Germany) installée devant lui. Le stylo numérique utilisé était muni d'une mine à encre permettant au participant d'écrire sur une feuille disposée sur la tablette (Ink pen ZP-130, Wacom), donc dans des conditions d'écriture usuelles. Une feuille de papier présentant 16 cases rectangulaires (correspondant aux 16 essais de chaque bloc expérimental), placée sur la tablette, permettait de recueillir les réponses (quatre feuilles étaient

donc suffisantes pour écrire les 64 mots requis). La position de la tablette était réglée afin que le participant soit dans une position confortable pour écrire en restant face à l'écran. Il avait la possibilité d'ajuster cette position avant le début de l'expérience si nécessaire. Un enregistrement continu de la production (à une fréquence de 200 Hz) était réalisé grâce au logiciel Eye and Pen 1.1 (Alamargot, Chesnet, Dansac, & Ros, 2006; Chesnet & Alamargot, 2005), aussi utilisé pour délivrer les stimuli, permettant une récupération ultérieure des latences et des durées d'écriture à la milliseconde près, ainsi que des mesures de la distance couverte par le stylo.

I.2.4. Procédure

La tâche proposée était une tâche de production écrite sous dictée de mots isolés. Dans chaque essai, un mot était présenté auditivement via le casque. Les participants devaient l'écrire dans l'espace prévu sur la feuille en commençant le plus rapidement possible. Un symbole « écrire » s'affichait à l'écran dès la fin de la présentation du stimulus et restait affiché 4500 ms (voir Figure V-1). Sa disparition indiquant aux participants la survenue de l'essai suivant (ils n'étaient cependant pas invités à interrompre leur production), après 1500 ms. Il y avait donc un intervalle de 6000 ms entre la fin de la présentation d'un mot et le début de la présentation du mot suivant. Les participants avaient pour consigne d'adopter une position « prêt à écrire » dès qu'ils avaient terminé l'écriture d'un mot, de sorte que les temps de réaction mesurés soient au minimum affectés par le mouvement initial de la main. Ils étaient invités à écrire de façon usuelle (écriture cursive, en minuscules), en évitant de faire des fautes d'orthographe, mais d'écrire chaque mot d'une traite, sans jamais revenir dessus. Les participants étaient informés qu'ils auraient à effectuer une tâche d'écriture conçue pour étudier la dynamique de la production écrite grâce à une tablette graphique. Nous n'avons pas présenté l'étude comme étant conçue pour explorer les compétences d'orthographe.

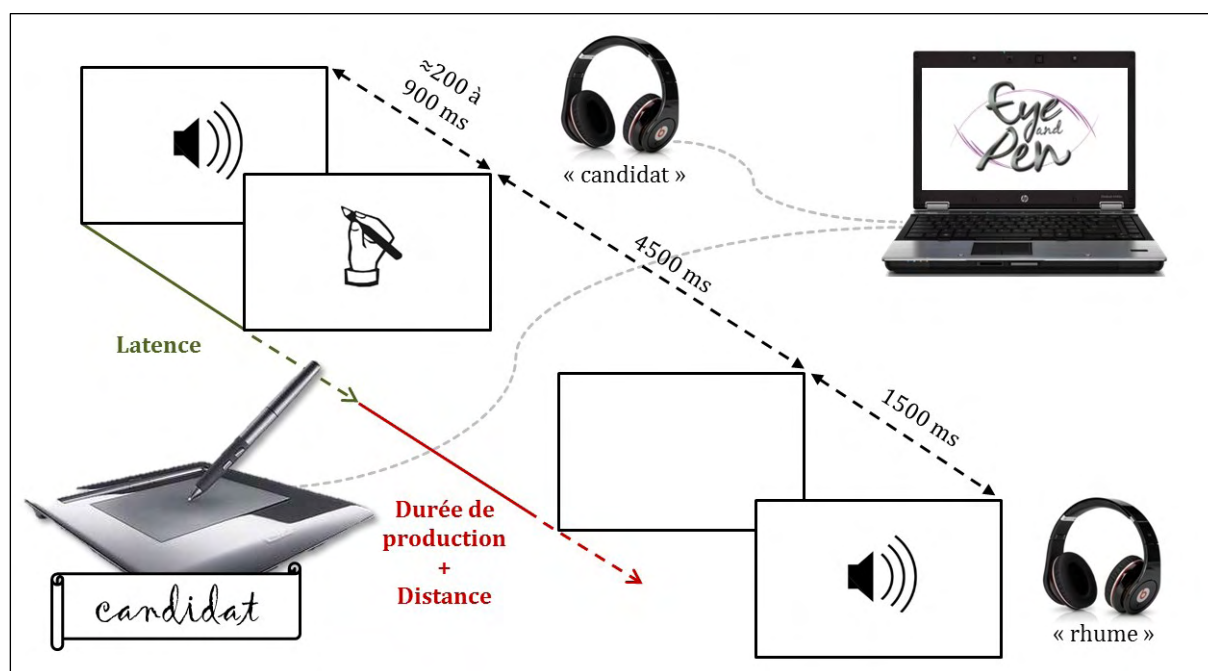


Figure V-1 : Schéma du dispositif utilisé

Après un bloc d'entraînement de 8 items, les 64 stimuli étaient présentés en blocs de 16 stimuli. Le participant déclenchait le début de chaque bloc en pressant une touche sur le clavier (le premier essai de chaque bloc débutait après un délai de 1000 ms). Les latences (ou temps de réaction), définies comme le temps écoulé entre le moment d'apparition du stimulus et la première pression par le stylo sur la tablette, étaient extraites des enregistrements Eye and Pen. Les durées d'écriture et les mesures de distances (en unités tablette, converties en centimètres) étaient aussi exportées pour chaque mot écrit. La vitesse moyenne d'écriture de chaque mot était ensuite calculée en divisant simplement la distance par la durée.

I.2.5. Analyse des données

Pour évaluer l'effet de nos différentes variables sur le taux d'erreur global (Longueur, Régularité, Position), des tests non paramétriques pour échantillons appariés ont été appliqués (test de Wilcoxon et ANOVA de Friedman). Lorsque nécessaire, les valeurs de p étaient corrigées par la procédure d'ajustement de Bonferroni-Holm (Holm, 1979).

Les latences d'écriture, puis les vitesses moyennes d'écriture ont été analysées sous R (R Development CoreTeam, 2009) en utilisant le package lme4 (Bates & Maechler, 2009). Les analyses ont été réalisées en utilisant les modèles linéaires mixtes en incluant les facteurs Sujet et Item en tant qu'effets aléatoires (cf. Chapitre IV.III). En tant qu'effets fixes, les facteurs Longueur, Régularité, Position et toutes leurs interactions ont été inclus. Pour l'analyse des

latences uniquement, la durée acoustique du stimulus était incluse dans le modèle en tant que covariable continue². En effet une tâche d'écriture sous dictée où les latences sont mesurées à partir de l'apparition du stimulus, un simple délai dans les latences peut résulter de durées de présentation (ou durées acoustiques) plus longues.

Une table de F (ANOVA de type III) incluant la valeur de p pour chacun des facteurs fixes et leurs interactions était calculée via le package *lmerTest* (Kuznetsova, Christensen, & Brockhoff, 2013) (degrés de liberté calculés selon l'approximation de Satterthwaite). Des procédures post-hoc sur les résultats du modèle linéaire mixte étaient ensuite réalisées via le package *lsmeans* (Lenth, 2013), permettant de réaliser des comparaisons des moyennes ajustées, en procurant une valeur de p (méthode de Tukey HSD).

I.3. Résultats

I.3.1. Erreurs

Les productions des sujets ont été examinées pour en recenser les différentes erreurs. Celles-ci représentaient 14,3% des essais. Les erreurs phonologiquement plausibles représentaient ainsi 83% des erreurs, 8,7% des erreurs étaient des remplacements du mot cible par un autre mot de la langue (mauvaise identification du stimulus), 3% des productions de pseudo-mots ou de mots non identifiables, 2,6% des réponses incomplètes et 2,6% des absences de réponse (le taux d'erreur dans chaque condition est présenté dans la Figure V-2).

Les analyses ont ainsi montré que les taux d'erreurs étaient significativement plus importants pour les mots courts que pour les longs (15,4% vs. 12,1 % ; $p < .02$), et plus importants pour les mots irréguliers que pour les mots réguliers (17,5% vs. 10,0% ; $p < .02$). Les ANOVA de Friedman incluant les facteurs Régularité et Position ($p < .0001$) puis Régularité et Longueur ($p < .0001$) suggéraient que le taux d'erreur était modulé par ces facteurs ; ainsi le taux d'erreur pour les mots irréguliers à l'initiale (22,6%) était supérieur au taux d'erreurs de chacune des trois autres catégories de mots (Réguliers-Initiale : 6,0%, $p_{\text{corrigé}} < .0002$; Réguliers-Finale : 13,9%, $p_{\text{corrigé}} < .004$; Irréguliers-Finale : 12,5%, $p_{\text{corrigé}} < .003$). De même, le taux d'erreur pour les mots courts et irréguliers (22,6%) était supérieur au taux d'erreurs de chacune des

² La formule utilisée sous R était donc de la forme suivante :

```
lmer.model <- lmer( RT ~ Longueur*Régularité*Position+DuréeAudio+(1|Sujet)+(1|Item), data=Données)
```

trois autres catégories de mots (Courts-Réguliers : 8,2%, $p_{\text{corrigé}} < .0002$; Longs-Réguliers : 11,8%, $p_{\text{corrigé}} < .0003$; Longs-Irréguliers : 12,5%, $p_{\text{corrigé}} < .0003$).

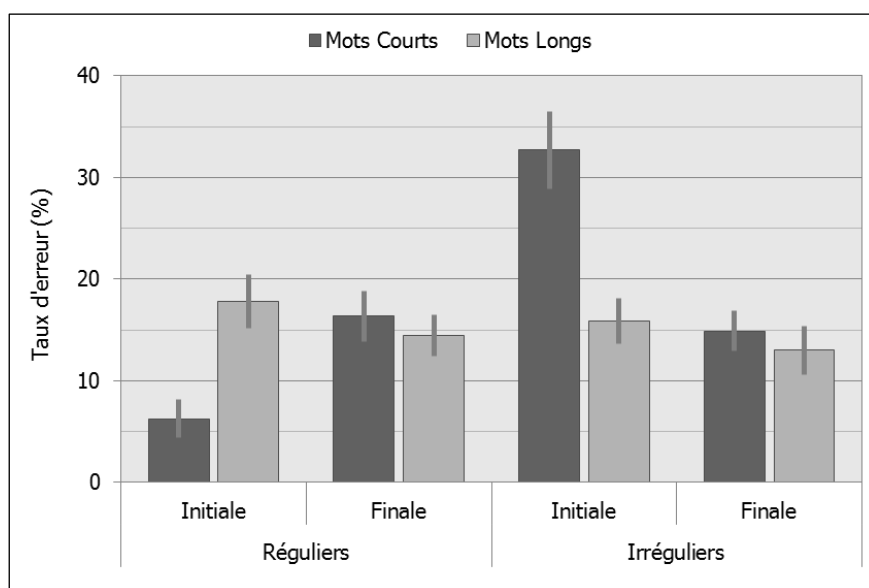


Figure V-2 Taux d'erreurs (%) en fonction des trois facteurs de régularité, position et longueur. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type.

Pour étudier plus en détail les liens entre la régularité et les erreurs produites, nous nous sommes intéressés aux erreurs orthographiques phonologiquement plausibles (PPE) qui concernaient spécifiquement la séquence d'intérêt, c'est-à-dire, le premier phonème pour les mots de la condition Position Initiale (e.g. mot *certitude* orthographié *sertitude*) et le dernier phonème pour les mots de la condition Position Finale (e.g. mot *plomb* orthographié *plon*). 154 erreurs de ce type ont été identifiées (voir Table V-2); 101 sur les graphèmes irréguliers contre 53 sur les graphèmes réguliers. De plus, 76% des erreurs produites sur les irréguliers consistaient en la production, par erreur, du graphème défini comme régulier.

Table V-2 : Nombre d'erreurs PPE localisées sur la séquence d'intérêt, en fonction des trois facteurs de régularité, position et longueur.

	Réguliers		Irréguliers	
	Initiale	Finale	Initiale	Finale
Mots Courts	0	25	44	13
Mots Longs	8	20	28	16

Les résultats sur les taux d'erreurs globaux suggéraient une interaction entre la régularité et la position. Les résultats d'un Chi² d'indépendance sur la quantité d'erreurs PPE localisées sur les séquences d'intérêt montre là encore une relation entre l'effet de l'irrégularité

et la position de celle-ci ($\chi^2 = 43,97$; $p < .0001$, voir Table V-3). L'effet de l'irrégularité sur ce type d'erreurs était visible sur l'initiale mais pas sur la finale.

Table V-3 : Table de contingence du nombre d'erreurs PPE localisées sur la séquence d'intérêt en fonction des facteurs de régularité et de position.

	Initiale	Finale	Total
Réguliers	8	45	53
Irréguliers	72	29	101
Total	80	74	

I.3.2. Latences d'écriture

Les analyses ont été effectuées sur les latences des essais corrects (voir moyennes et écart-types Table V-4) : 1426 essais sur 1664 (85,7 %), après suppression des latences aberrantes (supérieures à 2000 ms ou inférieures à 400 ms) : 39 items, soit 2,7%). Les données brutes (moyennes et écart-types) par condition sont présentées dans la Table V-4.

Table V-4 : Moyennes des latences (et écart-types), en fonction des trois facteurs de régularité, position et longueur (en ms).

	Réguliers		Irréguliers	
	Initiale	Finale	Initiale	Finale
Mots Courts	1097 (243)	1047 (233)	1189 (239)	1015 (172)
Mots Longs	1134 (229)	1079 (213)	1153 (197)	1044 (202)

Après construction d'un premier modèle (incluant les 3 principaux facteurs fixes et leurs interactions, le facteur fixe de durée acoustique du stimulus³ et les deux facteurs aléatoires), nous avons supprimé du modèle final les données dont les résidus standardisés excédaient 2,5 écart-types. Cette procédure permet d'éliminer les outliers éventuels en évitant les problèmes liés à un screening a priori trop strict qui négligerait la forme de la distribution des latences (procédure issue de Baayen & Milin, 2010 ; voir Chapitre IV). Cette procédure a conduit à la suppression de 35 points de données supplémentaires (soit 2,6 %).

³ Un test du rapport de vraisemblance (« likelihood ratio test ») comparant ce modèle avec un modèle plus simple n'incluant pas la durée acoustique comme covariable montrait que la qualité de l'ajustement était meilleure dans le premier ($\chi^2 = 21,8$; $p < .0001$). De plus, la corrélation entre la latence moyenne et la durée acoustique était significative : Pearson $r = 0,54$, $p < .001$.

Les effets de la Longueur (moyennes ajustées de 1139 ms pour les mots Courts contre 1081 ms pour les mots Longs ; $F(1, 52) = 5,46$; $p < .03$), de la Position (1138 ms pour les mots de la catégorie Initiale contre 1081 ms pour les mots de la catégorie Finale ; $F(1, 51) = 6,10$; $p < .02$) et de durée acoustique ($F(1, 51) = 32,6$; $p < .0001$) étaient significatifs.

Une interaction significative entre la Régularité et la Position était présente ($F(1, 51) = 6,72$; $p < .02$) traduisant⁴ des latences plus longues lorsque les mots étaient irréguliers à l'initiale (1178 ms) par rapport aux mots irréguliers sur la finale (1066 ms ; $T(56) = 3,56$; $p < .0008$) et par rapport aux mots réguliers à l'initiale (1098 ms ; $T(55) = 2,64$; $p = .02$) (voir Figure V-3).

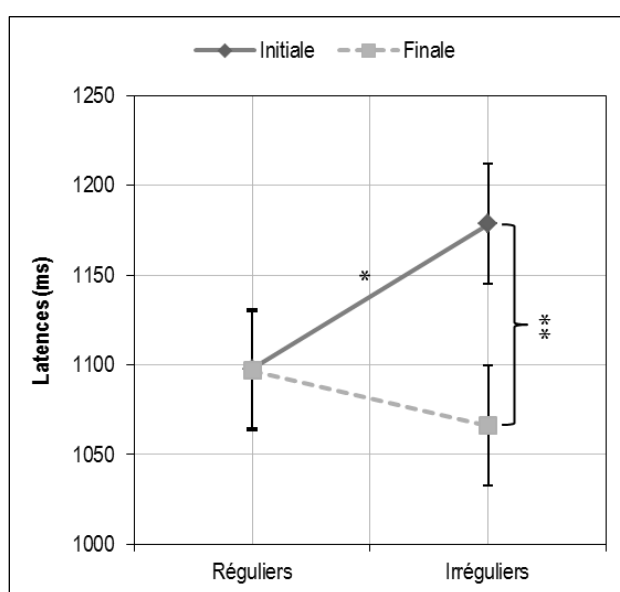


Figure V-3 : Interaction entre la régularité et la position sur les latences. Moyennes ajustées issues du modèle intégrant l'effet de la durée acoustique du stimulus. On constate un impact négatif de l'irrégularité apparaissant lorsque celle-ci est présente sur l'initiale (+81 ms) mais pas sur la finale (-30 ms), et se manifestant par une différence de latences entre les mots irréguliers sur l'initiale et irréguliers sur la finale (+112 ms). Les barres d'erreurs représentent l'erreur-type. n.s. : non significatif, * : $p < .05$, ** : $p < .01$.

⁴ Seules les comparaisons pertinentes étaient testées lors des tests post-hocs : effet de régularité au sein de la catégorie Initiale ou Finale, puis effet de position au sein de la catégorie Réguliers ou Irréguliers. La formule employée sous R était la suivante:

lsmeans (lmer.modelB, list(pairwise ~ Régularité | Position, pairwise ~ Position | Régularité)).

I.3.3. Vitesses moyennes d'écriture

Le même plan d'analyse a été utilisé pour analyser les vitesses moyennes d'écriture (à l'exception du facteur de durée acoustique du stimulus qui n'était pas inclus), exprimées en cm/s et correspondant à la simple division de la valeur de distance du tracé, mesurée par la tablette pour chaque essai, avec la durée d'écriture de l'essai correspondant (voir moyennes et écart-types Table V-5). Après suppression des valeurs extrêmes (supérieures à 6,0 cm/s ou inférieures à 1,5 cm/s ; 20 valeurs soit 1,4 %), les *outliers* ont été supprimés du modèle final (32 valeurs soit 2,3%).

Table V-5 : Moyennes des vitesses d'écriture moyenne par mot (et écart-types), en fonction des trois facteurs de régularité, position et longueur (en cm/s).

	Réguliers		Irréguliers	
	Initiale	Finale	Initiale	Finale
Mots Courts	3,37 (0,99)	3,25 (0,99)	3,16 (0,96)	3,26 (0,94)
Mots Longs	3,20 (0,88)	3,10 (0,91)	3,10 (0,88)	3,19 (0,94)

L'effet principal de la longueur apparaissait significatif avec une vitesse d'écriture moyenne supérieure pour les mots courts par rapport aux mots longs (3,26 cm/s contre 3,11 cm/s ; $F(1, 56) = 8,57$; $p < .005$).

Une interaction entre la régularité et la position était aussi présente ($F(1, 56) = 5,96$; $p < .02$). L'analyse post-hoc a révélé une différence de vitesse entre les mots réguliers à l'initiale et irréguliers à l'initiale (3,29 cm/s contre 3,10 cm/s ; $T(56) = 2,77$; $p < .04$).

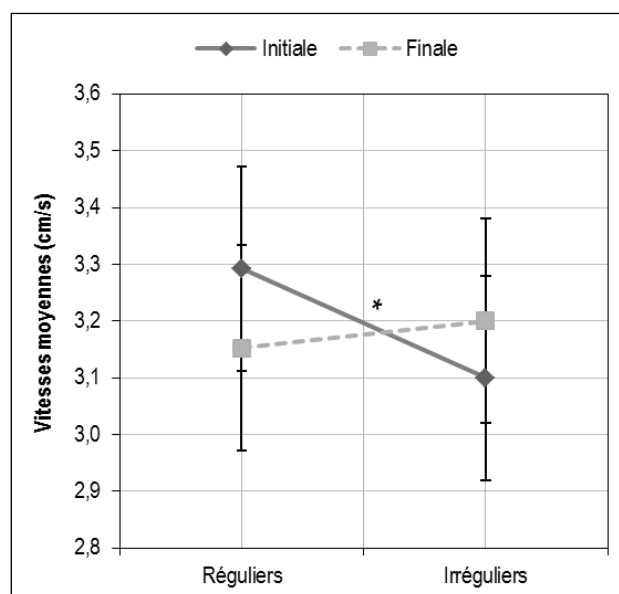


Figure V-4 : Interaction entre la régularité et la position sur les vitesses moyennes d'écriture (moyennes ajustées du modèle). On constate un ralentissement pour les mots dont l'irrégularité est présente sur la finale (-0,2 cm/s). Les barres d'erreurs représentent l'erreur-type. * : $p < .05$.

Synthèse des effets significatifs

Effet de la longueur des mots (1 syllabe vs. 3 syllabes)

- Latences plus longues pour les mots courts (+58 ms) (lorsque la durée acoustique est prise en compte).
- Vitesse moyenne d'écriture des mots courts plus élevée (+0,14 cm/s) et taux d'erreurs plus important (+3,3 %).

Effet de la régularité orthographique

- Taux d'erreur plus important pour les mots irréguliers par rapport aux réguliers (+7,5 %), en particulier en cas d'irrégularité initiale et/ou sur les mots courts.
- Latences plus longues pour les mots irréguliers à l'initiale, par rapport aux mots irréguliers sur la finale (+112 ms) ou réguliers sur l'initiale (+81 ms)
- Vitesses moyennes d'écriture plus lentes pour les mots irréguliers à l'initiale que pour les réguliers (-0,19 cm/s)

I.4. Discussion

I.4.1. Irrégularité et erreurs orthographiques

Selon la définition de la régularité phono-orthographique que nous avons utilisée (alternative aux mesures de consistances fournies dans une base de données comme LEXOP), si un phonème a plusieurs orthographes possibles, c'est celui dont les mots totalisent la plus haute somme de fréquence qui sera considéré comme régulier (ou présent). Bien que le nombre d'erreurs important que nous avons relevé ici n'était pas restreint aux séquences que nous avons manipulées (position initiale ou finale), nous avons constaté que les erreurs commises par nos scripteurs experts (tous étaient étudiants à l'université) étaient bel et bien plus nombreuses sur les mots irréguliers. On peut aussi noter qu'elles étaient plus fréquentes lorsque l'irrégularité était présente à l'initiale, sur les mots courts en particulier, et qu'elles consistaient pour une grande partie en des régularisations (en se basant sur la graphie que nous avons définie comme régulière). Par exemple, dans la position finale, le phonème /ɔ̃/ irrégulier dans *plomb* était parfois écrit {-on} comme dans *lion* ; le phonème /s/ à l'initiale, irrégulier dans *certitude* était écrit {-s-} comme dans *sépulture*. Il existe pourtant des cas où le critère de régularité/irrégularité n'a permis de prédire correctement le comportement. L'orthographe régulière du phonème /o/ en position finale est classiquement considérée comme étant {-eau}

(comme dans *escabeau*), pourtant la moitié des participants l'ont orthographié {-ot} (*escabot*) comme dans le mot irrégulier *escargot* (qui n'a lui généré aucune erreur). En effet nous avons considéré la régularité en se basant sur l'ensemble des mots de la langue, mais Soum et Nespoulous (Soum, 1997; Soum & Nespoulous, 1999) avaient mis en évidence la nécessité de considérer la structure syllabique dans le calcul de l'irrégularité : si {-eau} est bien la forme orthographique régulière d'un /o/ final sur les mono- et bisyllabiques (e.g. *bateau*), elle devient {-ot} sur les mots trisyllabiques de type CV. De plus si l'on considère les bisyllabiques de structure CV.CCV, la régularité devient {-o} (e.g. *méto*). Ces exemples soulignent à la fois les inconvénients de l'adoption d'une règle unique utilisant la fréquence des relations phonèmes-graphèmes dans la langue comme seul indicateur de la régularité, mais aussi du risque qu'il y a à baser ce type de mesures sur un échantillon de mots restreint et peu représentatif (e.g. uniquement des monosyllabiques).

I.4.2. Conception sérielle ou en cascade : effet de longueur de mot

Nous avons donc manipulé longueur de mot et position de la séquence irrégulière afin de contribuer au débat sur les mérites respectifs des conceptions sérielle ou en cascade de l'organisation temporelle des processus centraux et périphériques dans l'écriture. Nous avons recueilli les latences en tant qu'indices du degré de planification nécessaire avant le début de l'exécution graphomotrice, car, selon la conception strictement sérielle, toutes les manipulations des étapes «centrales» de la production écrite doivent affecter directement les latences (e.g. Damian & Stadthagen-Gonzalez, 2009). En revanche, dans la conception en cascade, les processus de planification et la résolution des conflits centraux peuvent se poursuivre après le début de la production motrice, en laissant les latences relativement inchangées mais en influençant la durée d'écriture (e.g. Delattre et al., 2006).

L'examen des données brutes suggère des latences globalement plus courtes pour les mots courts que pour les mots longs, mais cet effet de longueur n'était pas significatif dans un modèle n'incluant pas la covariable de durée acoustique du stimulus (1081 ms vs. 1101 ms ; résultats non rapportés). Contrairement à ce qu'aurait prédit une conception strictement sérielle, l'augmentation du nombre de graphèmes à programmer (et/ou de phonèmes à transcrire via la voie phonologique) n'implique pas de délai supplémentaire. Ce même résultat avait déjà notamment été observé par Lambert, Kandel, Fayol, et Esperet (2008) en comparant dans une tâche de copie des mots de deux et de quatre syllabes. En réalité, lorsque l'on prend en compte la durée acoustique du stimulus – qui a bien sûr un fort impact sur les latences (le point d'unicité phonologique étant généralement situé « temporellement » plus loin dans les mots plus longs),

l'effet de la longueur se manifeste paradoxalement par des latences plus longues pour les mots courts. En l'absence d'autre explication documentée, nous pouvons émettre l'hypothèse que cet effet, déjà par ailleurs déjà observé par Bonin et Méot (2002), s'explique par l'importante différence dans la densité de voisins phonologiques entre ces deux catégories de mots (13,4 voisins phonologiques pour les monosyllabiques contre 1 seul pour les trisyllabiques). L'effet perturbateur du voisinage phonologique sur la compréhension orale, qui s'explique par une plus grande compétition entre les différentes représentations phonologiques d'entrée activées, a en effet maintes fois été observé (e.g. Luce & Pisoni, 1998). Pourtant, la densité des voisins orthographiques, là aussi plus nombreux sur les monosyllabes, est supposée avoir des effets inverses (Roux & Bonin, 2009), par un jeu de renforcement par rétroaction des graphèmes composant les différentes représentations orthographiques des voisins (cf. Chapitre I.II.2.1). Si l'on retient l'explication du voisinage, on peut supposer ici que cet effet n'est pas suffisant pour contrebalancer l'effet phonologique lié à la compétition pour la reconnaissance de la cible. L'absence d'effet de voisinage phonologique en épellation sous dictée rapporté par Roux et Bonin (2009) s'explique peut-être par l'utilisation de monosyllabes (composés de 3 à 5 phonèmes) uniquement.

Nous avons néanmoins observé une réduction significative de la vitesse moyenne d'écriture des mots longs. Bien qu'il soit là-aussi difficile d'exclure un effet graphomoteur purement périphérique (la vitesse d'écriture diminuerait graduellement avec le nombre de graphèmes produits, du fait de changements de directions du tracé plus fréquents), cet effet pourrait résulter de l'influence de processus phono-orthographiques encore actifs au cours de la production. Il s'opposerait donc là encore à la conception d'une exécution motrice encapsulée et complètement planifiée.

I.4.3. Conception sérielle ou en cascade : effet de la position de l'irrégularité

I.4.3.1. Coût « central » de l'irrégularité ?

Les latences d'écriture n'étaient en moyenne pas significativement affectées par le facteur de régularité. Nos résultats indiquent que c'est en réalité la position de cette irrégularité qui était déterminante. Que le mot fut long ou court, l'initiation de la réponse graphomotrice semblait retardée uniquement lorsque la séquence lexicale irrégulière était située sur le premier phonème du mot (cet effet était en réalité particulièrement visible en comparant les mots irréguliers de la catégorie *Initiale* par rapport aux mots de la catégorie *Finale*). Cela confirme les

études antérieures montrant que les mots irréguliers nécessitent davantage de temps de traitement avant que la réponse motrice soit exécutée (Bonin & Méot, 2002; Bonin et al., 2001b; Delattre et al., 2006), mais nous avons donc aussi observé que les latences n'étaient pas affectées par la présence d'une irrégularité présente à la fin du mot. Un résultat semblable avait par ailleurs déjà été rapporté par Bonin et al. (2001b) en dénomination écrite. Cela suggère que l'initialisation était uniquement retardée lorsque le conflit (i.e. la compétition entre la représentation orthographique irrégulière correcte de la voie lexicale et celle issue de la voie phonologique) devait nécessairement être résolu, à savoir, lorsque l'irrégularité orthographique était sur localisée sur le tout premier phonème. Par conséquent, dans notre tâche, la planification semble se limiter à la première partie du mot, ce qui est ainsi seulement compatible avec une organisation temporelle en cascade des processus centraux et périphériques.

Après avoir constaté qu'à l'oral, la durée d'articulation n'était pas influencée par les processus cognitifs centraux (Damian, 2003), Damian avait observé dans une tâche d'amorçage implicite à l'écrit que les durées de réponse n'étaient pas affectées par la nature phonologiquement reliée ou non reliée du mot sonde, suggérant que le mot qui était produit était entièrement programmé avant l'exécution (Damian & Stadthagen-Gonzalez, 2009). Une explication pour ce résultat antagoniste, résiderait peut-être dans la nature des contraintes liées à la tâche, influençant le niveau d'implication des différents processus linguistiques. Bien que Bonin et al. (2005) aient montré que le contrôle stratégique des deux voies d'accès à la représentation orthographique ne semble pas possible dans une tâche d'écriture sous dictée, des résultats obtenus en production orale montrent que les individus sont capables d'adopter un « critère de réponse » qui leur permet de faire varier si nécessaire le degré de planification préalable de la réponse (Meyer et al., 2003) (voir aussi Kello, Plaut, & MacWhinney, 2000; avec l'interférence Stroop). Ainsi la tâche que nous avons utilisée (présentation auditive des stimuli) a pu favoriser une stratégie basée sur l'encodage phonologique précoce (et donc une planification graphomotrice restreinte aux tous premiers graphèmes) pour permettre la réponse la plus rapide possible. Dans ces conditions, le coût « central » de l'irrégularité (i.e. sur la programmation de la réponse, sur les latences) n'était présent que lorsque celle-ci était positionnée sur l'initiale.

1.4.3.2. Coût « périphérique » de l'irrégularité ?

Si toute irrégularité, quelle que soit sa position, implique un coût de traitement supplémentaire, l'absence de coût de l'irrégularité finale sur les latences suggère une résolution du conflit après le commencement de la réponse. La conséquence logique, suggérée par les

résultats de Delattre et al. (2006) sur les durées de production, est que la résolution de l'irrégularité finale, si elle n'est pas effective au moment de l'initialisation de la réponse, pourra se répercuter sur le comportement au cours de la production ; sur la vitesse d'écriture par exemple. Nous n'avons cependant pas observé un tel résultat, les vitesses d'écriture semblant au contraire, malgré d'importants écart-types liés à la différence entre courts et longs, plus ralenties lorsque l'irrégularité était présente sur l'initiale. Cette catégorie de mots, irréguliers à l'initiale, semblent ainsi induire, au-delà des latences plus longues, des vitesses d'écriture plus lentes et un nombre d'erreurs plus important (particulièrement chez les monosyllabiques). On ne peut déterminer si ce ralentissement résulte d'une « incertitude » lors de l'écriture de la séquence irrégulière chez les sujets ayant correctement orthographié le mot, lié à la persistance d'un conflit non résolu au moment de débiter la production, ou de variables confondues liées au matériel (la fréquence de bigrammes était contrôlée mais bien d'autres facteurs relatifs à la nature des graphèmes produits sont susceptibles d'avoir une influence sur la vitesse d'exécution).

Quoi qu'il en soit, le coût « périphérique » (sur la vitesse moyenne d'écriture du mot) était bel et bien présent, mais en réalité limité aux irrégularités initiales. Puisque Delattre et al. (2006) n'avaient utilisé que des monosyllabes et n'avaient pas contrôlé la position de l'irrégularité dans le mot, on ne peut dire que nos résultats soient contradictoires. Un résultat similaire était tout de même été rapporté par Roux et al. (2013) dans une tâche de copie. Ces chercheurs ont montré que la durée moyenne d'écriture des traits (*strokes*) composant la première lettre du mot était plus importante lorsque le mot était irrégulier au début (bien que l'identité de cette première lettre fût identique, contrôlée, entre mots réguliers irréguliers). Cependant, la position de l'irrégularité n'était pas nécessairement confondue avec l'initiale du mot (i.e. la toute première lettre) comme cela était le cas ici, autorisant les auteurs à conclure à une résolution de l'irrégularité pendant la production de la première lettre. Au moment où nous enregistrons la vitesse d'écriture d'un mot irrégulier à l'initiale, le conflit était nécessairement statué puisque l'écriture du premier graphème (différent selon la voie à partir de laquelle il était récupéré) était exécutée. Donc, si l'on écarte tout biais potentiel lié à la nature des différents graphèmes produits dans les différentes conditions (certains caractères étant susceptibles de générer des vitesses de production plus ou moins importantes), il apparaît au travers de nos résultats que ce conflit (même « résolu ») continue dans une certaine mesure d'affecter la dynamique de la production. L'écriture cursive que nous avons utilisée ici permet cependant difficilement de mesurer la durée d'écriture par lettre et donc d'aller plus loin dans l'interprétation de cet effet.

1.4.3.3. Absence de coût d'une irrégularité finale ?

Nous avons observé qu'une irrégularité phono-orthographique présente en fin de mot n'entraînait pas de délai dans l'initialisation de la réponse (ni ne ralentissait la vitesse d'écriture), suggérant soit que cette séquence finale n'était pas encore véritablement programmée au moment de l'initialisation, soit que celle-ci ne nécessitait aucun coût de programmation supplémentaire. Une planification initialement d'étendue restreinte, mais ensuite réalisée « online » (pendant l'écriture du mot) peut ainsi expliquer l'absence d'effet de l'irrégularité finale sur les latences et une absence d'effet de la longueur des mots. L'observation faite par Kandel et al. (2006) ou Álvarez, Cottrell, et Afonso (2009) d'intervalles inter-lettres plus longs aux frontières syllabiques en écriture sous dictée renforce par ailleurs cette idée d'une planification graphomotrice procédant par petites unités. Nous n'avons cependant pas pu mettre en évidence de coût périphérique supplémentaire sur une telle programmation « online » lorsque la finale du mot était irrégulière, mais peut-être est-ce parce que notre mesure de la vitesse moyenne du mot entier n'était pas assez sensible pour cela. Selon une autre hypothèse, la voie lexicale étant réputée plus rapide que la procédure de conversion, on peut supposer qu'au moment où la représentation orthographique lexicale est activée, seuls les premiers phonèmes du mot ont été convertis en graphèmes (les deux voies étant activées en parallèle; e.g. Folk et al., 2002; Houghton & Zorzi, 2003) et donc seuls ceux-ci sont susceptibles de générer un conflit et donc un « coût » sur le comportement. La procédure de conversion serait interrompue avant son terme et l'irrégularité finale ne générerait pas de coût particulier. On peut en effet constater qu'il n'y avait pas davantage d'erreurs orthographiques sur la finale pour les mots irréguliers par rapport aux mots réguliers.

1.5. Conclusion

En résumé, nos résultats plaident plutôt en faveur de l'organisation en cascade des fonctions centrales, consacrées à la récupération de l'orthographe par les voies lexicale et sublexicale et la résolution des ambiguïtés phono-orthographiques, et des fonctions périphériques dédiées à la gestion et l'exécution de la sortie motrice. Nous ne sommes cependant pas parvenus à démontrer l'existence d'une perturbation périphérique liée à une résolution d'une irrégularité finale pendant l'exécution. Nous avons suggéré que la programmation graphomotrice était effectuée « online » mais que nos mesures de vitesses n'étaient pas assez sensibles pour détecter cet effet. Ce résultat pourrait cependant s'expliquer par une programmation du mot à écrire qui serait, passé le délai initial, finalement basée sur la représentation orthographique issue de la voie lexicale (la procédure de conversion n'arrive pas

à son terme et l'irrégularité finale n'est donc pas réellement conflictuelle). On peut aussi avancer la possibilité d'un biais lié à une mauvaise caractérisation de la régularité orthographique, qui serait de nature différente selon la position (les mots de la langue pouvant comporter de nombreuses terminaisons, liées aux pluriels ou aux verbes conjugués, l'orthographe de la fin des mots serait gérée différemment de celle du début), lié à des limitations de notre dispositif. La constitution de listes appariées sur les séquences d'intérêt et contrôlées sur un grand nombre de variables, ne nous a par exemple pas permis d'utiliser un nombre très conséquent de stimuli, ni de contrôler la régularité des autres unités de chaque mot (e.g. séquence initiale pour les mots de la catégorie « irréguliers sur la finale »). De plus, si l'écriture cursive est la forme d'écriture la plus usuelle et répandue, c'est un objet d'étude compliqué lorsque l'on souhaite étudier la dynamique de l'écriture. Il est par exemple souvent difficile d'identifier les frontières entre les lettres et donc de mesurer la durée des intervalles inter-syllabes ou inter-lettres, précédant par exemple une séquence irrégulière. Il nous semble néanmoins que les méthodes d'analyse de la vitesse du tracé peuvent être améliorées et nous permettre ainsi mieux comprendre la répercussion des étapes centrales du traitement sur les étapes les plus périphériques. Nous nous sommes donc mis pour objectif dans un premier temps de proposer un calcul de consistance sur un échantillon d'items plus représentatifs de la langue afin de pouvoir conduire une nouvelle expérimentation.

II. MESURES DE CONSISTANCE PHONO-ORTHOGRAPHIQUE SUR UN LARGE ECHANTILLON D'ITEMS

II.1. Introduction

Nous avons pu constater que beaucoup des chercheurs étudiant la production verbale écrite chez des adultes experts utilisaient préférentiellement dans leurs études des mots monosyllabiques, particulièrement lorsque des effets de régularité ou de consistance sont étudiés. Il n'existe en effet pas à ce jour de base de données procurant des mesures de consistance prenant en compte la grande complexité orthographique et linguistique de l'ensemble des mots du français (cf. Chapitre III). La base LEXOP par exemple (Peereman & Content, 1999), si elle prend en compte la structure des mots (mesures différentes sur l'attaque, la voyelle, la coda), est restreinte à des mots monosyllabiques. La restriction en termes de taille de l'échantillon d'où ces mesures proviennent (N = 2 449) peut avoir des conséquences sur la recherche en psycholinguistique, notamment en réduisant la flexibilité dans la constitution de listes de stimuli contrôlées sur différents paramètres simultanément. De manière plus

importante, un problème de représentativité peut se poser. Les mots de trois syllabes ou davantage seraient ainsi les plus représentatifs du lexique (Vallée & Rousset, 2004), ce qui est confirmé par l'analyse d'un corpus important comme celui de LEXIQUE (Lexique.org ; New et al., 2001) (6,7 % de mots de 1 syllabes, 30,2% de 2 syllabes, 40,4% de 3 syllabes, 18,0% de 4 syllabes, 4,7% de 5 syllabes et plus).

Une base de données incluant des mesures de consistances basées sur toutes les unités infralexicales et s'étendant aux mots de plusieurs syllabes a déjà été fournie par Peereman, Lete, et Sprenger-Charolles (2007) (Manulex-Infra). Celle-ci, destinée particulièrement à l'étude de l'apprentissage de la lecture et de l'écriture, se basait sur des analyses de fréquence de mots présents dans des livres de l'école élémentaire (environ 49 000 entrées lexicales : MANULEX; Lete, Sprenger-Charolles, & Cole, 2004). Une telle base de données proposant des mesures de consistance détaillées et sur un large échantillon a montré son utilité pour l'étude et la compréhension des performances orthographiques d'enfants de différentes classes scolaires (Lete, Peereman, & Fayol, 2008), mais la nature de l'échantillon utilisé pour sa constitution permet difficilement une généralisation à l'étude de l'écriture « experte » (adulte).

Dans le but de fournir des mesures de consistance à destination de l'étude chez l'adulte et qui ne soient pas limitées aux mots monosyllabiques, nous avons donc réalisé des calculs de consistance phono-orthographique restreints à deux unités par mot (cf. ci-après) mais en englobant le plus grand nombre de formes orthographiques du français possible (i.e. quel que soit le nombre de lettres ou de syllabes, la catégorie grammaticale, et en incluant les formes fléchies ; $N > 140\ 000$). L'intérêt de ce travail préliminaire (ne prenant pas en compte toutes les unités infralexicales) est donc d'abord de fournir des mesures de consistance sur un grand nombre de mots afin d'être en mesure de sélectionner plus facilement des listes de stimuli contrôlées sur un grand nombre de variables (fréquence lexicale, fréquence de bigrammes, nombre de lettres, etc.), mais surtout d'améliorer la représentativité de telles mesures en vue de favoriser la généralisation des effets observés. Comme le choix de réaliser des mesures de consistance différentes selon la position de chaque unité dans la structure d'un mot dans la base LEXOP ou dans les travaux de Lecours et Soum l'illustre déjà, la position d'un phonème dans un mot aura une influence cruciale sur la probabilité que telle ou telle unité orthographique lui corresponde. Ici, nous nous sommes restreints à des calculs réalisés à deux positions : le phonème initial et le phonème final de chaque mot, et ce, tant pour des raisons théoriques (cf. résultats précédents), que pragmatiques, (les premier et dernier phonèmes sont facilement identifiables et un tel calcul s'affranchit de la prise en compte de la structure interne des mots).

Les résultats de ces mesures, proposant des valeurs de consistance phono-orthographique à deux positions pour l'ensemble des mots de la langue ont ensuite été utilisés

pour sélectionner des stimuli pour une expérimentation en écriture sous dictée. Un des objectifs de cette expérimentation était de valider la pertinence de ces mesures pour prédire le comportement de scripteurs adultes experts.

II.2. Méthode de calcul

Nous avons calculé le degré de consistance phono-orthographique sur l'ensemble des mots fournis dans la base Lexique 3.80 (Lexique.org ; New et al., 2004), et ce, pour deux positions spécifiques : le phonème initial et le phonème final du mot (les mots ne comportant qu'un seul phonème : *à, ou, et, en*, etc., ont été exclus). Cette base de données des mots du français fournit, pour plus de 142 000 formes orthographiques (incluant les formes fléchies : formes conjuguées des verbes, formes féminines et plurielles), de nombreuses informations utiles à notre calcul telles que la fréquence lexicale ou un codage de la forme phonologique canonique.

En se basant essentiellement sur la représentation phonémique fournie pour l'ensemble des mots de la langue dans Lexique 3.80, nous avons d'abord identifié l'ensemble des différents phonèmes existant en position initiale (e.g. phonème /ã/ dans *ancien*), puis pour chacun de ces phonèmes, répertorié les différentes graphies correspondantes (e.g. {en}, {em}, {an}, {han} etc.). Tous les mots correspondants étaient inclus et n'étaient pas distingués selon leur nombre de syllabe ou encore leur catégorie grammaticale. La même procédure a ensuite été réalisée sur les phonèmes finaux.

Pour chaque phonème donné, nous avons ensuite calculé la consistance « type » (en divisant le nombre de mots présentant une relation phonie-graphie donnée par le total des mots présentant ce phonème) et la consistance « token » (en divisant la somme des fréquences des mots présentant une relation phonie-graphie donnée par la somme des fréquences des mots présentant ce phonème). La variable « fréquence livres » fournie dans Lexique 3.80 a été utilisée pour ce dernier calcul. Ce travail a été réalisé indépendamment pour la position initiale et pour la position finale.

Les valeurs de consistance de chaque couple phonème-graphème à chacune des deux positions étaient donc calculées. Pour chaque mot de la base LEXIQUE, nous étions donc en mesure de lui associer les valeurs de consistance (type et token) de son phonème initial et de son phonème finale, nous permettant ultérieurement de réaliser une recherche de stimuli sur la base de leur consistance ainsi que d'examiner la distribution de la valeur de consistance au travers de la base.

II.3. Description des données et discussion

40 phonèmes différents ont été identifiés en position initiale, comportant en moyenne 4,2 graphies possibles ($\pm 3,5$), et 36 en position finale comportant en moyenne 13,8 graphies possibles ($\pm 9,1$) (les {s} muets issus des pluriels étant notamment inclus). Une liste des phonèmes identifiés avec le nombre de graphies possibles, le nombre d'occurrences, et la somme des fréquences des mots concernés pour les deux positions considérées est présentée dans l'Annexe 2.2. La table détaillée des valeurs de consistance pour chaque couple phonème-graphème est par ailleurs présentée Annexe 2.3.

Cette asymétrie entre les positions initiale et finale, traduisant une plus grande « opacité » de l'orthographe de la fin des mots, se manifeste aussi lors du calcul de la consistance et justifie la nécessité de prendre en compte la position considérée lors de ce type de calcul. En effet, pour l'ensemble des mots considérés (environ 142 000), nous avons obtenu une consistance « token » moyenne de .84 pour l'initiale (consistance « type » de .86) contre .25 pour la finale (consistance « type » de .26).

Le profil de distribution de la valeur de consistance dans le lexique est ainsi très différent selon la position initiale ou finale de l'unité considérée. Les mots présentant une consistance token initiale supérieure à 0,6 représentent 90,6% des mots du lexique tandis que les mots présentant une consistance token finale supérieure à 0,6 n'en représentent que 10,7%. La valeur médiane de la consistance est aussi très éclairante puisqu'elle est de 0,98 pour la consistance « token » de l'initiale (consistance « type » de .94) contre .20 pour la finale (consistance « type » de .23). Les valeurs de consistance type et token pour différents centiles sont présentées dans la Table V-6.

Table V-6 : Moyennes et percentiles de la valeur de consistance de l'initiale et de la finale sur l'ensemble de la base

	Moyenne	C10	C25	C50	C75	C90
Consistance Initiale Token/Type	.84 / .86	.65 / .57	.77 / .87	.98 / .94	1 / 1	1 / 1
Consistance Finale Token/Type	.25 / .26	.03 / .09	.07 / .15	.20 / .23	.39 / .35	.66 / .55

Ces observations sur le nombre de graphies possibles et sur la distribution de la valeur de consistance dans l'ensemble de la base mettent clairement en évidence une dissociation entre la consistance phono-orthographique du premier et du dernier phonème des mots de la langue française. Les calculs montrent en effet une consistance à l'initiale en moyenne très élevée ; les mots inconsistants à l'initiale sont très peu nombreux dans le lexique. La prise en compte de toutes les formes dérivées ou fléchies des mots a semble-t-il conduit au contraire à une

consistance moyenne très basse sur la finale des mots ; l'inconsistance y serait la norme. Cette observation renforce selon nous la nécessité de la prise en compte de la position de l'unité considérée lors de l'étude des effets comportementaux de la consistance.

L'utilisation d'un très grand nombre de mots, de une et plusieurs syllabes, issus de catégories grammaticales variées nous permet a priori d'obtenir une plus grande finesse et une plus grande représentativité de la variable de consistance pour traduire objectivement la notion de régularité orthographique (si l'on définit celle-ci comme déterminée par les fréquences d'usage). Cela peut ainsi entraîner des divergences par rapport à des résultats obtenus via d'autres méthodes ou différents échantillons : ainsi concernant le phonème /ã/ en position finale par exemple, parmi les 26 formes orthographiques identifiées, 3 émergent clairement : {ant}, {ent} et {ans} (avec une consistance token de .27, .25 et .25, respectivement). Des calculs similaires réalisés sur un échantillon plus restreint ; en ne considérant que des monosyllabiques (monomorphémiques) et la nature de l'unité orthographique (VC), rapportent une valeur la consistance de ces trois unités, de .03, .02 et .36 (données issues de la base LEXOP). De telles divergences doivent nous amener à réfléchir sur cette mesure de consistance et la façon de la calculer pour modéliser de la manière la plus fiable possible l'organisation dans le système cognitif de la force des liens entre unités phonologiques et unités orthographiques. En ce sens, l'utilisation de grands échantillons de mots tel que proposé ici, bien que nos mesures restent encore partielles (premier et dernier phonème) et négligent certains aspects que l'on sait importants comme la structure syllabique (Soum, 1997) ou certaines régularités graphotactiques (e.g. Treiman & Kessler, 2006), devrait permettre d'améliorer cette fiabilité.

III. EXPERIMENTATION : EFFETS DE CONSISTANCE PHONO-ORTHOGRAPHIQUE EN ECRITURE DE MOTS SOUS DICTEE

Une tâche de production écrite sous dictée analogue à l'expérimentation préliminaire a été proposée à des scripteurs adultes. Il s'agissait de tester des prédictions relatives à nos propres mesures de consistance et d'interpréter des effets comportementaux de l'interaction entre la longueur du mot et la présence d'une inconsistance initiale et/ou finale dans le cadre du débat entre les conceptions sérielle et en cascade précédemment évoqué.

Des listes de mots consistants et inconsistants sur le phonème initial ou final, de 1, 2 et 3 syllabes ont été constituées et proposées à nos participants. Dans un premier temps, nous avons réalisé une analyse des erreurs orthographiques produites pour valider les mesures de consistance réalisées. L'effet sur le taux d'erreurs de la position de la séquence inconsistante (à

l'initiale ou sur la finale) a aussi été examiné. Une analyse quantitative plus détaillée a cherché à caractériser la nature des erreurs produites pour évaluer, sous l'angle de la valeur de consistance, s'il s'agissait bien de « régularisations » (i.e. utilisation du graphème le plus consistant pour un phonème donné).

Dans un second temps, des analyses des différentes données comportementales à notre disposition ont été conduites (temps de réaction, vitesses moyennes d'écriture). Nous avons souhaité de plus introduire des analyses complémentaires portant sur la vitesse d'écriture dans différentes « portions » du mot, et ce, afin d'obtenir davantage d'informations sur la nature d'un éventuel effet « périphérique » (i.e. au cours de l'exécution motrice) de la présence d'unités inconsistantes.

III.1. Matériel et méthode

III.1.1. Participants

27 sujets adultes francophones (18 femmes, 9 hommes), étudiants à l'université, ne présentant pas de trouble de la perception visuelle ou auditive, ni d'antécédents de trouble neurologique, psychiatrique, ou d'acquisition du langage oral ou écrit, ont participé à cette expérience. Leur âge moyen était de 26,0 ans ($\pm 6,0$).

III.1.2. Stimuli

Des listes de mots ont été constituées selon 3 facteurs : leur longueur (1 syllabe vs. 2 syllabes vs. 3 syllabes), leur consistance initiale (« consistant » vs. « inconsistant ») et leur consistance finale (« consistant » vs. « inconsistant »), constituant ainsi 12 sous-catégories. Chacune de ces sous-catégories comporte 15 items, soit un total de 180 items. Les mots considérés étaient tous des noms au singulier, monomorphémiques et ne présentant pas d'homophones. Lors de la constitution de ces listes, nous avons porté une attention particulière à les équilibrer en fréquence lexicale ainsi qu'en fréquence de bigrammes et de trigrammes. Concernant le phonème initial, les mots de la catégorie « consistants » avaient une consistance « token » moyenne de .99 contre .15 pour les inconsistants. Concernant le phonème final, les mots de la catégorie « consistants » avaient une consistance « token » moyenne de .69 contre .14 pour les inconsistants. La valeur de consistance relativement basse des mots consistants sur la finale découle d'une propriété intrinsèque des mots de la langue concernant la finale (consistance moyenne de .25, comme évoqué précédemment). Les caractéristiques linguistiques

des items en fonction de la longueur, la consistance initiale et la consistance finale sont présentées dans la Table V-7 ci-après. La liste des items est disponible Annexe 2.4.

Table V-7 : Caractéristiques linguistiques des items utilisés dans la tâche d'écriture sous dictée (n = 180) en fonction de leur longueur, puis de leur consistance initiale, puis de leur consistance finale. Les valeurs en gras représentent les différences significatives lors d'un test t (e.g. mots consistants vs. inconsistants à l'initiale). * : $p < .05$; *** : $p < .001$. Les différences significatives concernant la longueur des mots l'étaient pour chacune des trois différences testées (i.e. 1 vs. 2 syllabes, 1 vs. 3 et 2 vs. 3).

	Longueur des mots			Consistance initiale		Consistance finale	
	1 syllabe	2 syllabes	3 syllabes	Consistant	Inconsistant	Consistant	Inconsistant
Nombre de lettres	5,1***	6,9***	8,9***	6,9	7,0	7,0	6,9
Nombre de phonèmes	3,2***	4,8***	7,1***	5,2	4,8	5,1	4,9
Nombre de syllabes	1,0***	2,0***	3,0***	2,0	2,0	2,0	2,0
Fréquence Films (lemmes)	10,5	9,1	8,8	9,5	9,4	10,6	8,3
Fréquence Livres (lemmes)	19,3	18,4	15,8	17,9	17,8	19,1	16,6
Fréquence Films	7,5	6,5	6,9	7,1	6,9	7,8	6,1
Fréquence Livres	13,3	13,6	11,9	13,1	12,7	13,7	12,1
Fréquence de trigrammes (token)	821	1001	826	872	891	863	900
Fréquence de trigrammes (type)	2118	2530	2048	2240	2243	2061	2422
Fréquence de bigrammes (token)	7039	6984	6807	6889	7017	6718	7188
Fréquence de bigrammes (type)	19609	21068	20389	20446	20383	19609	21221
Voisins phonologiques	12,0***	3,9***	0,7***	5,7	5,5	5,4	5,7
Voisins orthographiques	4,2***	1,1***	0,4***	2,1	1,7	2,4*	1,4*
Point d'unicité phonologique	3,2***	4,7***	6,2***	4,9*	4,4*	4,8	4,6
Durée Acoustique	1130***	1350***	1608***	1365	1360	1475*	1250*
Consistance Initiale (type)	0,55	0,58	0,60	0,98***	0,17***	0,58	0,57
Consistance Initiale (token)	0,55	0,58	0,57	0,99***	0,15***	0,57	0,56
Consistance Finale (type)	0,31	0,31	0,32	0,29	0,33	0,50*	0,12*
Consistance Finale (token)	0,40	0,41	0,44	0,40	0,44	0,69*	0,14*

Les stimuli, prononcés par une locutrice avec un accent et une intonation neutres, étaient enregistrés dans les mêmes conditions que lors de l'expérimentation précédente.

III.1.3. Procédure

Il s'agissait là encore d'une tâche de production écrite sous dictée de mots isolés. Le matériel et le dispositif utilisés étaient les mêmes que précédemment. Une feuille de papier A4 présentant 45 cadres rectangulaires et placée face au sujet était destinée à recueillir les productions (4 feuilles étaient utilisées pour la production des 180 mots requis).

Contrairement à l'expérimentation précédente, les participants déclenchaient ici eux-mêmes l'apparition du stimulus auditif en pressant un bouton sur la tablette avec leur main gauche. Celui-ci survenait après une latence d'une seconde. L'essai suivant ne débutait pas avant

que le participant n'ait à nouveau pressé le bouton. Ce dispositif était utilisé afin de mieux tenir compte des variabilités interindividuelles (certains participants étant plus rapides que d'autres, l'existence d'une limite temporelle pour chaque production était susceptible d'affecter les productions de certains) et d'éviter la mise en place d'un « critère de réponse » (sous la forme d'un rythme régulier) risquant d'« uniformiser » les temps de réactions (voir par exemple les résultats de Meyer et al., 2003 montrant une disparition de l'effet de longueur à l'oral lorsque mots courts et longs étaient mélangés au sein des mêmes blocs).

Comme précédemment, après un bloc d'entraînement de 8 items permettant au participant de se familiariser avec le dispositif, les 180 stimuli étaient présentés en blocs de 45 stimuli, séparés par des pauses.

III.1.4. Analyse des données

L'analyse des données obtenues a été réalisée en deux étapes, guidées par des objectifs différents. Dans un premier temps, nous souhaitons fournir une analyse quantitative et qualitative des erreurs produites (afin de valider expérimentalement l'analyse de consistance présentée section II de ce chapitre). Tout d'abord, pour tester les effets de la consistance initiale, de la consistance finale et de la longueur des mots sur le taux d'erreur, des tests non paramétriques pour échantillons appariés ont été appliqués (test de Wilcoxon et ANOVA de Friedman). L'analyse détaillée des erreurs, consistant notamment à isoler et comptabiliser les erreurs phonologiquement plausibles produites exactement sur les séquences manipulées (initiale ou finale), est développée dans la section III.2.2 ci-après.

Dans un second temps, les analyses de la dynamique de l'écriture (latences et vitesses moyennes) ont comme précédemment (cf. section I.2.5 de ce chapitre) été réalisées sous R (R Development CoreTeam, 2009) en utilisant les packages *lme4* (construction du modèle), *lmerTest* (table d'ANOVA des effets) et *lsmeans* (tests post-hoc HSD de Tukey). Les facteurs Sujet et Item était inclus dans le modèle en tant qu'effets aléatoires. En tant qu'effets fixes, les facteurs Longueur (1 syllabe vs. 2 syllabes vs. 3 syllabes), Consistance-initiale (Consistant vs. Inconsistant), Consistance-Finale (Consistant vs. Inconsistant) et leurs interactions ont été inclus. Pour l'analyse des latences uniquement, l'effet simple de la durée acoustique du stimulus était inclus en tant que covariable (ce qui permettait d'améliorer la qualité de l'ajustement par rapport au modèle ne l'incluant pas : $\chi^2 = 20,97$; $p < .0001$).

En outre, une analyse visant à évaluer les effets de nos facteurs sur l'évolution de la vitesse d'écriture au sein de chaque production a été introduite. La méthode employée est détaillée dans la section III.3.3.1 ci-après.

III.2. Résultats partie 1 : analyse des erreurs

III.2.1. Taux d'erreurs

27 sujets ont écrit les 180 mots. Sur les 4860 productions attendues, 4273 ont été écrites correctement, soit un taux d'erreur moyen global de 12,1 %. Les analyses ont montré que les taux d'erreurs étaient significativement plus importants lorsque l'initiale était inconsistante plutôt que consistante (17,2% vs. 7,0% ; $p < .0001$) et également lorsque la finale était inconsistante plutôt que consistante (14,4% vs. 9,8% ; $p < .0001$). L'effet de la longueur des mots n'était quant à lui pas significatif (12,0% pour les mots de 1 syllabe ; 13,2% pour les 2 syllabes et 11,0% pour les 3 syllabes ; $p = .39$).

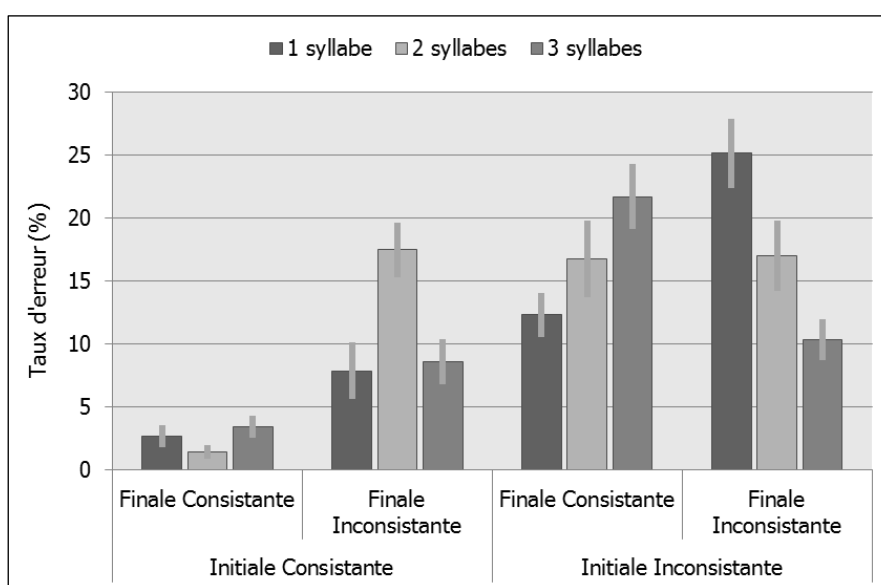


Figure V-5 Taux d'erreurs (%) en fonction des trois facteurs de longueur, consistance initiale et consistance finale. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type.

III.2.2. Analyse des erreurs

Nous avons souhaité étudier la nature des erreurs produites en se concentrant en particulier sur les erreurs phonologiquement plausibles : erreurs orthographiques lors desquelles le graphème cible est remplacé par un graphème phonétiquement proche ou identique (e.g. mot *phase* écrit {faze}).

Toutes les erreurs produites ont donc été relevées et catégorisées pour ne conserver que les erreurs phonologiquement plausibles ; ont donc été écartées les déplacements, insertions, substitutions, omissions de lettres ne produisant pas de phonèmes plausibles (13 occurrences),

les néologismes (pseudo-mots, produits par des sujets n'ayant pas reconnu ou mal compris le mot cible ; 8 occurrences), les ajouts d'accents injustifiés (21 occurrences), ainsi que toute erreur formelle lorsque le mot cible est remplacé par un autre mot de la langue, qu'aucun mot n'est reconnu, ou qu'une rature est survenue sur la production (48 occurrences). 595 erreurs phonologiquement plausibles ont été identifiées, réparties sur 530 mots produits.

Puisque nos mesures de consistance se restreignaient au phonème initial et au phonème final du mot, nous avons séparé les erreurs produites exactement sur l'initiale (221 occurrences), des erreurs produites exactement sur la finale (195 occurrences) et des erreurs à d'autres positions dans le mot (179 occurrences).

Comme attendu, le nombre d'erreurs était nettement plus important sur les séquences que nous avons classées comme inconsistantes : 6 erreurs à l'initiale sur les consistants à l'initiale contre 215 pour les inconsistants (soit 2,7% contre 97,3%), 10 erreurs sur la finale sur les mots consistants sur la finale contre 185 pour les inconsistants (soit 5,1% contre 94,9%). Les erreurs localisées à d'autres positions dans le mot n'apparaissaient pas clairement influencées par nos facteurs de consistance initiale et finale. Seule la longueur du mot augmentait la quantité d'erreurs internes : 21 erreurs sur les mots de 1 syllabe, 54 pour les 2 syllabes et 104 pour les 3 syllabes (voir Table V-8).

Table V-8 : Nombre d'erreurs PPE sur l'initiale, sur la finale et internes, selon la longueur du mot et la consistance initiale et finale

	Erreurs PPE sur l'initiale		Erreurs PPE sur la finale		Erreurs PPE internes
	Initiale Consistante	Initiale Inconsistante	Finale Consistante	Finale Inconsistante	
1 syllabe	5	79	6	72	21
2 syllabes	1	59	3	88	54
3 syllabes	0	77	1	25	104

Afin de vérifier que ces erreurs consistaient en des « régularisations » d'une relation phonie-graphie inconsistante, nous avons relevé pour chaque erreur la consistance de la relation phonie-graphie échouée (i.e. la « cible ») et la consistance de la relation phonie-graphie alternative réellement produite (de l'erreur). Un test t de Student a été utilisé pour les comparaisons.

Concernant les **221** erreurs portant sur l'initiale, la consistance-type était en moyenne de **0,12** pour la cible contre **0,59** pour l'erreur produite ($T(220) = 13,96$; $p < .0001$) et la consistance-token était en moyenne de **0,08** pour la cible contre **0,56** pour l'erreur produite ($T(220) = 15,42$; $p < .0001$). La moyenne de la consistance des graphèmes produits par erreur était donc significativement supérieure à celle des graphèmes cibles (+0,46 en Consistance-type

et +0,48 en Consistance-token). Concernant les **195** erreurs portant sur la finale, la consistance-type était en moyenne de **0,11** pour la cible contre **0,17** pour l'erreur produite ($T(194) = 4,49$; $p < .0001$) et la consistance-token était en moyenne de **0,11** pour la cible contre **0,24** pour l'erreur produite ($T(194) = 6,78$; $p < .0001$). La moyenne de consistance des graphèmes produits par erreur était donc significativement supérieure à celle des graphèmes cibles (+0,07 en Consistance-type et +0,13 en Consistance-token). Les valeurs de consistance des cibles et des erreurs selon la position sont rapportées dans la Table V-9 ci-après.

Pour aborder ce résultat d'une manière différente, un delta de consistance a été calculé pour chaque erreur produite : [Consistance-token de l'erreur produite] – [Consistance-token de la cible]. Ainsi, concernant les erreurs PPE sur l'initiale du mot nous pouvons considérer (en utilisant des bornes arbitraires) que **79,2%** des erreurs constituaient des régularisations (delta supérieur à +0,10), **10,4%** des « dé-régularisations » (delta inférieur à -0,10 ; le graphème choisi est moins « probable » que le graphème cible) et **10,4%** des erreurs alternatives (la graphie utilisée par erreur est de même consistance que la graphie correcte ; delta entre -0,10 et +0,10). Concernant les erreurs PPE portant sur la finale du mot, **51,8%** des erreurs constituaient des régularisations, **19,5%** des « dé-régularisations » et **28,7%** des erreurs alternatives (différence de consistance entre +0,10 et -0,10).

Table V-9 : Consistance moyenne, rang moyen et rang médian des couples phonèmes-graphèmes cible et produits par erreur, dans le cas d'erreurs sur l'initiale ou sur la finale.

	Erreur sur l'initiale		Erreur sur la finale	
	Cible	Erreur	Cible	Erreur
Consistance-type	0,12	0,59	0,11	0,17
Consistance-token	0,08	0,56	0,11	0,24
Rang moyen	2,7	1,7	6,0	4,1
Rang médian	2,0	1,0	4,0	2,0

Les erreurs produites apparaissent donc comme majoritairement des régularisations ; l'erreur produite est d'une consistance supérieure à la cible échouée. Cependant, du fait de certaines propriétés de la distribution de la consistance décrites précédemment (e.g. consistance finale souvent basse, même parfois pour la graphie la plus consistante), la sélection d'une graphie plus consistante ne se traduit pas nécessairement par un delta de consistance important. Nous avons donc souhaité examiner le rang de chaque graphie utilisée parmi les graphies possibles, notamment pour répondre à l'hypothèse d'une utilisation (dans le cas d'une erreur orthographique) du graphème le plus consistant pour un phonème donné. Ainsi, en classant pour chaque phonème les différentes graphies possibles de la plus consistante à la moins consistante (par exemple pour le phonème /ɛ̃/ à l'initiale, on obtiendra : 1. {in} ; 2. {im} ; 3. {ain} ; 4. {hin} ; 5. {ein}), on peut en déduire que les erreurs commises consistaient en la

production de la graphie supérieure d'un rang (en moyenne) concernant l'initiale et de deux rangs concernant la finale (les rangs moyen et médian des cibles et des erreurs sont aussi rapportés Table V-9). Dans 60% des cas, la graphie produite par erreur était de rang 1 concernant l'erreur sur l'initiale (41% pour l'erreur sur la finale).

III.3. Résultats partie 2 : analyse de la dynamique de l'écriture

III.3.1. Analyse des latences

Les analyses étaient effectuées sur les latences des essais corrects : 4272 trials sur 4860 (87,9 %), après suppression des temps de réaction aberrants (supérieurs à 2000 ms ou inférieurs à 400 ms : 82 latences (soit 1,9%)). Les moyennes et écart-types des latences par condition sont présentées dans la Table V-10.

Table V-10: Moyennes des latences (et écart-types), en fonction des facteurs de consistance initiale, finale et de longueur (en ms).

	Initiale Consistante		Initiale Inconsistante	
	Finale Consistante	Finale Inconsistante	Finale Consistante	Finale Inconsistante
1 syllabe	924 (202)	856 (197)	1000 (238)	1055 (265)
2 syllabes	887 (211)	897 (218)	1014 (238)	998 (231)
3 syllabes	920 (218)	907 (209)	1069 (250)	1045 (221)

Après construction d'un premier modèle (incluant les 3 principaux facteurs fixes et leurs interactions, le facteur fixe de durée acoustique du stimulus et les deux facteurs aléatoires), nous avons supprimé du modèle final les données dont les résidus standardisés excédaient 2,5 écart-types. Cette procédure a conduit à la suppression des 122 points de données supplémentaires (soit 3,0 %).

Au-delà de l'effet significatif de la durée acoustique ($F(1, 164) = 30,3$; $p < .0001$), l'effet principal de la consistance à l'initiale du mot (consistants : 903 ms ; inconsistants : 1049 ms ; $F(1, 162) = 121,7$; $p < .0001$) et l'effet de longueur (1 syllabe : 1008 ms ; 2 syllabes : 962 ms ; 3 syllabes : 958 ms ; $F(2, 163) = 4,12$; $p < .02$) étaient significatifs. Une analyse post-hoc a montré que les latences étaient plus longues pour les monosyllabiques, par rapport aux bisyllabiques ($T(168) = 2,69$; $p < .03$) et aux trisyllabiques ($T(169) = 2,39$; $p < .05$). L'effet de la consistance finale n'était pas significatif ($F(1, 163) = 2,56$; $p = .11$) (voir graphique de la Figure V-6). Une tendance était présente sur la triple interaction Longueur x Consistance-Initiale x Consistance-Finale ($F(1, 162) = 2,54$; $p = .082$).

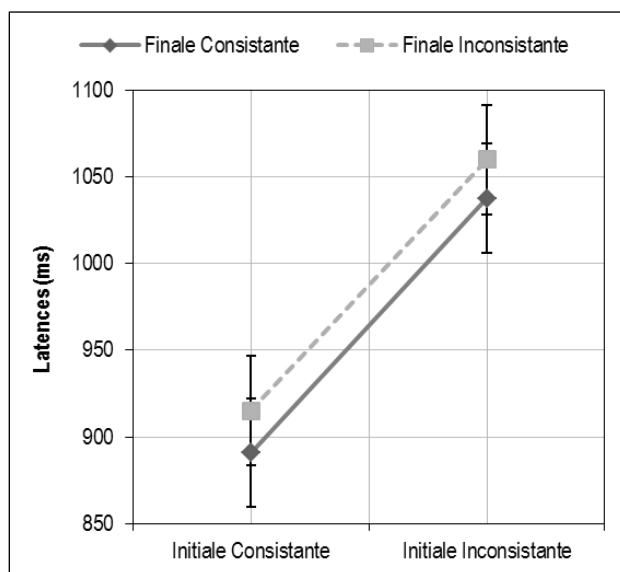


Figure V-6 : Effets de consistance initiale et finale sur les latences. L'effet principal de la consistance initiale était significatif (+ 146 ms ; $p < .0001$), pas l'effet de la consistance finale (+23 ms ; $p = .11$).

III.3.2. Analyse des vitesses moyennes

Le même plan d'analyse a été utilisé pour analyser les vitesses moyennes d'écriture, exprimées en cm/s et correspondant à la simple division de la valeur de distance du tracé, mesurée par la tablette pour chaque essai, avec la durée d'écriture de l'essai correspondant. Après suppression des valeurs extrêmes (supérieures à 6 cm/s ou inférieures à 1,5 cm/s ; 31 valeurs soit 0,7%), les *outliers* ont été supprimés du modèle final (115 valeurs soit 2,8%). Les vitesses moyennes par condition sont présentées dans la Table V-11 ci-dessous.

Table V-11 : Moyennes des vitesses d'écriture (et écart-types), en fonction des facteurs de consistance initiale, finale et de longueur (en cm/s).

	Initiale Consistante		Initiale Inconsistante	
	Finale Consistante	Finale Inconsistante	Finale Consistante	Finale Inconsistante
1 syllabe	3,28 (0,74)	3,27 (0,74)	3,14 (0,71)	3,19 (0,73)
2 syllabes	3,29 (0,75)	3,23 (0,78)	3,29 (0,82)	3,16 (0,80)
3 syllabes	3,17 (0,74)	3,21 (0,79)	3,15 (0,76)	3,03 (0,72)

Seul l'effet principal de la consistance sur la finale du mot apparaissait significatif ; $F(1, 167) = 4,45$; $p < .04$ (3,26 cm/s pour les consistants vs. 3,18 cm/s pour les inconsistants).

On peut se poser la question de la nature d'un effet sur la vitesse moyenne d'écriture des mots puisque nous n'avons pas contrôlé la nature des gestes requis pour écrire chaque mot : les courbes et les boucles sont par exemple produites avec une vitesse supérieure quand des changements fréquents de direction du geste réduisent cette vitesse. Des gestes plus fréquents, donc plus automatisés sont aussi très susceptibles d'entraîner des vitesses d'écriture supérieures, indépendamment des effets orthographiques ciblés dans ce travail.

Nous avons tenté de prendre en compte l'influence de l'automatisme par le biais de la fréquence des bigrammes et des trigrammes composant les mots. Alors que l'ajout en covariable de la fréquence moyenne des trigrammes n'a pas d'influence sur la qualité de l'ajustement, la fréquence moyenne des bigrammes l'améliore sensiblement ($\chi^2 = 7,28$; $p < .007$). L'effet de la fréquence des bigrammes était significatif dans un tel modèle ($F(1, 166) = 8,17$; $p < .005$). Un effet marginal de la consistance finale était observé ($F(1, 166) = 3,60$; $p < .060$; moyennes ajustées de 3,26 cm/s pour les consistants vs. 3,18 cm/s pour les inconsistants).

III.3.3. Analyse des vitesses instantanées au cours du temps

Afin de mieux appréhender les effets de consistance orthographique sur la vitesse d'écriture, qui est selon nous un bon indicateur de la qualité des processus périphériques, nous avons analysé les « vitesses d'écriture instantanées » (ou VI) au cours de la durée d'écriture d'un mot. En effet, les résultats ont montré un effet d'une inconsistance finale sur les vitesses moyennes d'écriture. Puisque cette inconsistance finale n'avait pas d'effet sur les latences, cela pourrait traduire un coût de la résolution de l'inconsistance, résolution survenue après l'initialisation de la réponse. Il est ainsi utile de tenter de « localiser temporellement » cet effet pour valider ou invalider cette interprétation.

III.3.3.1. Méthode

La VI utilisée ici est simplement définie comme le rapport entre la distance entre un point n et un point $n+1$ et la durée écoulée entre ces points. Dans le souci d'être en mesure de comparer l'évolution de la vitesse instantanée (i.e. courbes de la VI au cours de la durée de l'essai), au travers de mots écrits avec une durée très variable (durée d'écriture moyenne par mot : 2518 msec, écart-type : 825 msec), chaque courbe est rééchelonnée et interpolée (en fonction de la durée de production de l'essai) afin d'aboutir à des courbes comportant chacune 100 points (assimilables à des *pourcentages de la durée de l'essai*) (voir une illustration de ce processus Figure V-7). Il est important de noter que les éventuelles pauses n'étaient pas exclues :

la vitesse instantanée peut donc prendre la valeur 0 pendant une certaine durée. Afin de faciliter les comparaisons, 5 séquences d'intérêt ont été définies ; 1-20 % de la durée de l'essai (S1), 21-40 % (S2), 41-60 % (S3), 61-80 % (S4) et 81-100% (S5). Le choix de ces bornes vise à « localiser » grossièrement les éventuels effets de la consistance initiale et la consistance finale sur la production au cours du temps. Un pas de 20% a été défini après l'exploration visuelle des courbes de vitesse instantanée sur un certain nombre d'items chez différents sujets qui laissait apparaître une accélération pendant les 20 premiers pourcents de l'exécution du geste d'écriture. Pour chacune de ces séquences et pour chaque essai, les moyennes de la hauteur de la courbe sont calculées (i.e. pour aboutir à 5 valeurs de vitesse par essai, en cm/s), pour être ensuite analysées via des modèles linéaires mixtes incluant là encore les effets aléatoires Sujet et Item. A titre d'illustration, des courbes moyennes point par point des VI par condition ont aussi été construites pour chaque sujet (des courbes moyennes au travers des sujets sont visibles dans les Figure V-8 ou Figure V-9 de la section suivante).

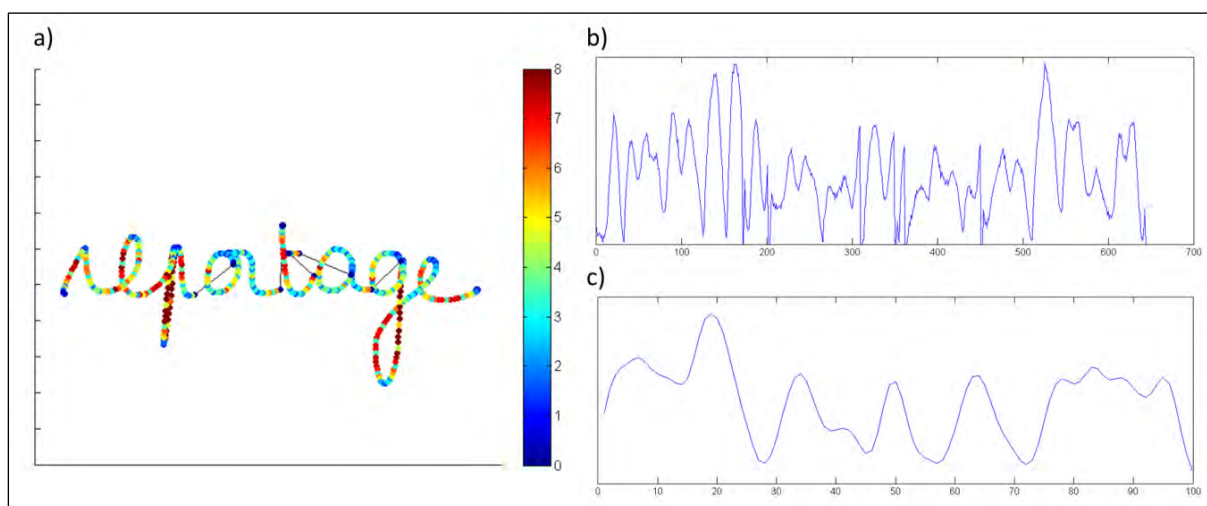


Figure V-7 : Illustration du traitement de la vitesse instantanée au cours du temps. a) Exemple de production d'un participant. Le code couleur représente la vitesse instantanée en chaque point. **b)** Evolution de la vitesse au cours de la production (échelle en ms). **c)** Courbe de la vitesse instantanée après ré-échantillonnage en fonction de la durée et convolution par un noyau gaussien (échelle en « % de durée »).

III.3.3.2. Analyses par séquences : tous les mots

Des analyses indépendantes ont été conduites pour chacune des 5 séquences d'intérêt au travers de l'ensemble des essais recueillis en incluant les trois facteurs fixes (i.e. Longueur, Consistance-Initiale, Consistance-Finale) et les deux facteurs aléatoires (Sujet et Item). Les mêmes procédures d'élimination des *outliers* que précédemment ont été appliquées (valeurs extrêmes inférieures à 0,5 cm/s ou supérieures à 8 cm/s, environ 2 à 3% des données par analyse).

L'effet de Longueur était significatif pour les séquences S1 ($F(2, 168) = 5,99 ; p < .004$), S3 ($F(2, 165) = 4,46 ; p < .02$), S4 ($F(2, 168) = 4,40 ; p < .02$) et S5 ($F(2, 168) = 11,49 ; p < .0001$). Cet effet dont l'interprétation est limitée étant donnée la nature de la variable considérée (e.g. les 0 à 20% de la durée d'écriture d'un monosyllabique ne couvrent pas les mêmes distances et durées brutes que les 0 à 20% d'un mot de 3 syllabes), suggère une vitesse d'écriture plus rapide des mots de 1 syllabe sur les séquences S1 et S4, une vitesse plus rapide des mots de 2 syllabes sur la séquence S3 ou encore une vitesse plus lente des mots de 3 syllabes sur la séquence S5.

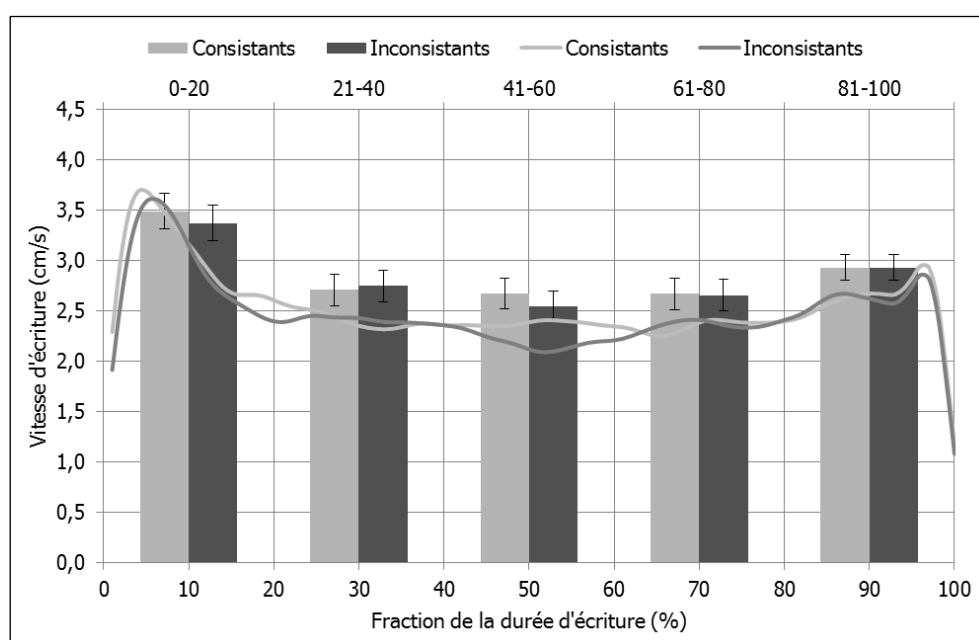


Figure V-8 : Profil de la vitesse d'écriture en fonction du pourcentage de la durée selon la consistance initiale (indépendamment de la longueur des mots). L'histogramme en bâtons représente les moyennes ajustées (et erreur-types) des vitesses pour chacune des cinq sections. Les courbes représentent les valeurs brutes moyennes après lissage.

L'effet de Consistance-Initiale n'apparaissait significatif pour aucune des 5 séquences (voir Figure V-8) mais l'effet de consistance finale était significatif pour les séquences S2 ($F(1, 167) = 4,35 ; p < 0.04$) et S5 ($F(1, 168) = 12,32 ; p < 0.0006$) (voir Figure V-9). La vitesse d'écriture des mots consistants en fin de mot étant plus élevée que pour les mots inconsistants sur ces portions (2,82 cm/s vs. 2,64 cm/s en S2 et 3,08 cm/s vs. 2,78 cm/s en S5).

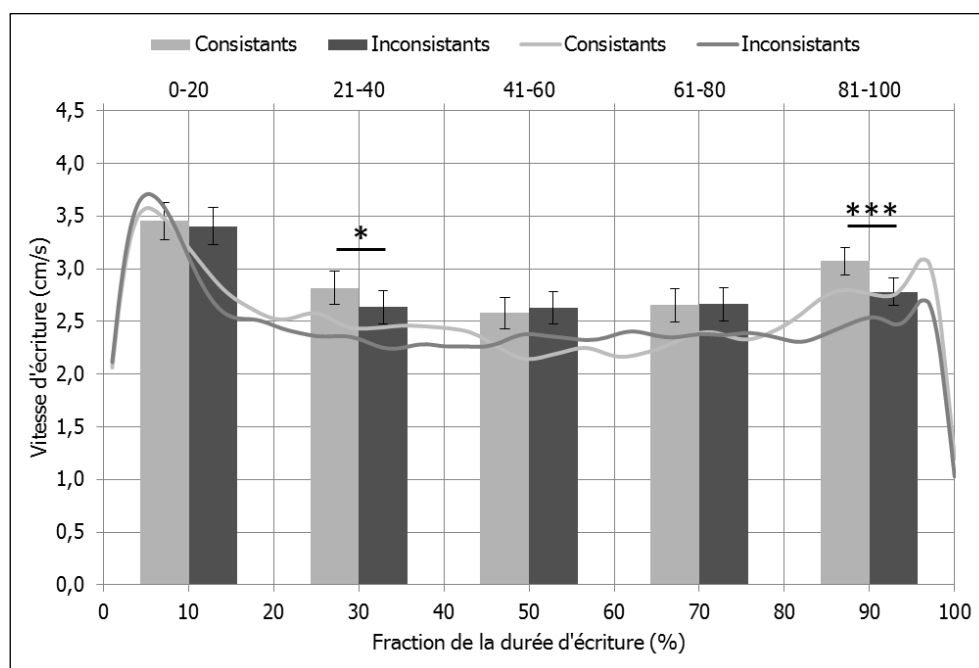


Figure V-9 : Profil de la vitesse d'écriture en fonction du pourcentage de la durée selon la consistance finale (indépendamment de la longueur des mots). L'histogramme en bâtons représente les moyennes ajustées (et erreur-types) des vitesses pour chacune des cinq sections. Les courbes représentent les valeurs brutes moyennes après lissage. * : $p < .05$; *** : $p < .001$.

L'effet de Consistance-Finale observé dans les vitesses d'écriture moyennes reposerait donc essentiellement sur les 20 derniers pourcents de la durée de la production. Pour expliquer ce résultat, on peut s'appuyer sur le constat que les lettres constituant des séquences inconsistantes en fin de mot (dans la langue, comme dans notre liste de stimuli) sont souvent différentes de celles constituant des mots plus consistants. La lettre {e} en fin de mot en particulier est très souvent présente en français dans des mots consistants (« fraise », « roche »), ce qui est beaucoup moins le cas pour des mots inconsistants (« drap », « tronc »). La présence de cette lettre, produite sous la forme d'une simple boucle en écriture cursive, est susceptible d'entraîner une vitesse d'écriture plus élevée et peut-être expliquer le résultat observé. En effet, dans notre liste en particulier, 76,5% des mots consistants se terminaient par un {e} contre seulement 27% des mots inconsistants.

Afin d'aborder ce problème, les analyses portant sur l'effet de la Consistance-Finale sur la vitesse d'écriture en S5 (81-100% de la durée) ont été reconduites en ajoutant dans le modèle une variable catégorielle, en tant que facteur fixe, indiquant la présence ou l'absence d'un {e} final. Un test du rapport de vraisemblance entre ce nouveau modèle et le précédent montrait que la qualité de l'ajustement ne s'améliorait pas significativement ($\chi^2 = 0,56$; $p = .45$). L'effet de Consistance-Fin, bien que fortement atténué, restait significatif dans ce nouveau modèle ($F(2, 167) = 4,11$; $p < .05$).

III.3.3.3. Analyses par séquences : sous-ensembles par longueur de mot

Comme évoqué précédemment l'interprétation des résultats peut être biaisée du fait de la nature de la variable choisie ; les pourcentages de durées n'impliquent pas les mêmes durées réelles selon que le mot est plutôt long ou plutôt court. Ainsi la séquence finale inconsistante va par exemple recouvrir les 30 ou 40 derniers pourcents de la durée d'un mot court quand elle comprendra seulement les 10 à 20 pourcents de la durée d'écriture d'un mot long. Il peut donc être nécessaire de réaliser des analyses indépendantes sur des portions du jeu de données en fonction du nombre de syllabes.

Ces analyses par séquence réalisées sur les mots de **1 syllabe** ont révélé : un effet de la Consistance-Finale en S4 ($F(1, 56) = 4,58$; $p < .04$) ainsi que plusieurs tendances non significatives (Consistance-Initiale en S3 : $p = .07$; Consistance-Finale en S5 : $p = .09$; interaction Consistance-Finale x Consistance-Initiale en S3). Mais cet effet en S4 disparaissait en intégrant la variable catégorielle « Présence d'un {e} final » ($F(1, 56) = 1,91$; $p = .17$).

Sur les mots de **2 syllabes** : on observait un effet de Consistance-Finale en S5 ($F(1, 56) = 12,64$; $p < .001$) mais qui là encore n'était plus présent lorsque l'on intégrait la variable catégorielle « Présence d'un {e} final » dans l'analyse ($F(1, 54) = 0,01$; $p = .94$).

Sur les mots de **3 syllabes** : uniquement un effet de Consistance-Finale en S2 ($F(1, 56) = 7,65$; $p < .008$) ainsi qu'une tendance en S4 ($p = .06$) (voir Figure V-10). A l'exclusion de ce dernier, tous les effets précédemment décrits pour les 3 longueurs de mots vont dans le sens d'un ralentissement lié à l'inconsistance.

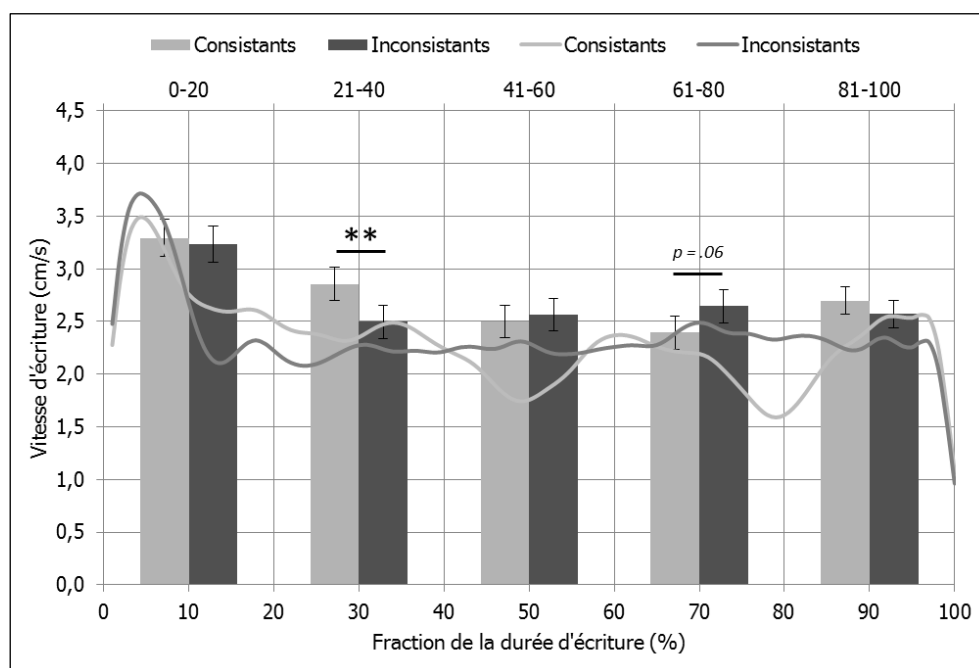


Figure V-10 : Profil de la vitesse d'écriture en fonction du pourcentage de la durée selon la consistance finale sur les mots de 3 syllabes. **: $p < .01$.

Synthèse des effets significatifs

Effet de la longueur des mots

- Latences plus longues pour les mots de 1 syllabe par rapport aux mots de 2 syllabes (+46 ms) et de 3 syllabes (+50 ms) (la durée acoustique du stimulus est prise en compte)

Effet de la consistance phono-orthographique

- Taux d'erreur plus important pour les mots inconsistants par rapport aux consistants : sur l'initiale (+10,2 %) et sur la finale (+4,6 %).

- Latences plus longues pour les mots inconsistants à l'initiale (+146 ms). Vitesses moyennes d'écriture plus lentes pour les mots inconsistants sur la finale (-0,09 cm/s).

- Le ralentissement de la vitesse pour les mots inconsistants sur la finale serait principalement localisé sur le deuxième et le dernier cinquième de la production.

- Lors d'analyses de chaque sous-ensemble de mots (1, 2 ou 3 syllabes), ce ralentissement en fin de mot s'avère souvent relever d'un biais (présence d'un {e} final).

- Sur les trisyllabiques uniquement, vitesse d'écriture plus lente sur le deuxième cinquième de la durée lorsque la finale était inconsistante (-0,36 cm/s)

III.4. Discussion

III.4.1. Consistance et erreurs orthographiques

L'analyse des erreurs produites par nos participants a tout d'abord confirmé que les mots mesurés comme inconsistants, que ce soit sur l'initiale ou sur la finale, génèrent effectivement davantage d'erreurs que les mots consistants. En focalisant sur les erreurs de type orthographiques (phonologiquement plausibles) survenues uniquement sur les séquences dont la consistance était manipulée, l'impact de l'inconsistance sur la probabilité d'erreur est d'autant plus confirmé : les erreurs sur les séquences définies comme inconsistantes en représentaient la grande majorité. Avec l'échantillon de mots utilisé, ce résultat est observé de la même manière sur l'initiale ou sur la finale, et quelle que soit la longueur des mots considérés. Nous avons ensuite souhaité évaluer dans quelle mesure les erreurs produites par les sujets suivaient bien les propriétés de la consistance phono-orthographique et constituaient des régularisations des séquences irrégulières ou inconsistantes. Les résultats montrent en effet que la consistance moyenne des erreurs produites était en moyenne significativement supérieure à celle de la cible échouée, signifiant que les sujets ont le plus souvent tendance à sélectionner un graphème plus « probable ». Ce résultat était bien sûr prévisible ; du fait même que les séquences échouées

avaient une faible consistance, leur remplacement par des graphèmes d'une consistance encore inférieure (forcément moins nombreux, voire inexistant) était très improbable.

III.4.1.1. Impact de la position de l'inconsistance

La différence de statut entre l'initiale des mots, très souvent consistante, et la finale, très rarement consistante, semble se traduire par un profil d'erreurs différent. Bien que la consistance des cibles échouée soit sensiblement la même dans les deux cas (autour de 0,10), les erreurs semblent en effet sensiblement plus nombreuses et apparaissent bien plus clairement comme des régularisations lorsque l'inconsistance est sur l'initiale (« gain de consistance » de +0,48 sur l'initiale contre seulement +0,13 sur la finale). Pourtant, cette apparente divergence dans l'« amplitude » de la régularisation peut être remise en cause par l'effet sur le rang des différentes graphies. Malgré que le nombre de graphies possibles pour un phonème donné soit bien supérieur pour les phonèmes finaux que pour les phonèmes initiaux, les sujets auront tendance dans les deux cas à sélectionner une graphie supérieure de deux rangs en moyenne. Ce résultat illustre une des limites de l'utilisation de la consistance pour étudier la régularité orthographique (notamment au travers de listes de mots non appariées phonologiquement comme nous l'avons fait ici) ; la valeur de consistance associée à un graphème peut être basse du point de vue de l'ensemble des mots de la langue et pourtant indiquer le graphème le plus consistant ou régulier pour un phonème donné (e.g. couple /ã/ - {ant} sur la finale a une consistance faible de 0,27 mais cette graphie est la plus consistante parmi 25 autres graphies possibles).

Dans un travail récent en écriture sous dictée, Bonin et Delattre (2010) distinguaient les mots consistants (1 seule graphie possible), des mots inconsistants présentant une graphie « dominante » (graphie de rang 1) et des mots inconsistants présentant une graphie « sous-dominante » (graphie de rang inférieur). Les résultats montraient que les taux d'erreur et des latences suivaient graduellement cette organisation (meilleures performances pour les consistants, diminuent pour les inconsistants dominants et diminuent à nouveau pour les inconsistants sous-dominants). Les auteurs en ont déduit que la procédure sous-lexicale n'entraînait pas l'activation (ou la sélection) de la seule graphie dominante en présence d'un mot inconsistant (il y a bien une différence de performances entre les mots consistants et les inconsistants dominants), conformément à l'hypothèse de l'activation de correspondances multiples (Barry & Seymour, 1988). Bien que notre approche ne distinguait pas véritablement les graphies purement consistantes (qui dans l'absolu, si l'on inclut les formes fléchies des mots dans le calcul, n'existent pas en position finale), nos données sont tout à fait en accord avec cette

hypothèse. Les erreurs produites semblent suivre une sélection « probabiliste » des différentes correspondances d'un phonème (de la graphie dominante jusqu'aux plus rares) plutôt qu'une activation/sélection de la seule graphie dominante.

L'observation que le nombre d'erreurs sur les séquences que nous avons manipulées était globalement similaire selon qu'il s'agissait de l'initiale ou de la finale ne semble pas s'accorder avec la conception d'une procédure de conversion sous-lexicale qui procède de manière séquentielle. Si les erreurs à l'initiale reflètent le résultat d'un conflit lors de l'intégration de données contradictoires en provenance des deux voies (i.e. lorsque seule la première unité graphémique du mot a été obtenue par conversion), on aurait en effet pu s'attendre à un taux d'erreurs moins important sur les séquences de fin de mot, d'autant plus que celui-ci est long, la représentation lexicale correcte du mot entier ayant dans ce cas-là déjà été activée et engagée (c'est ce que l'on observait lors de notre première étude). Plusieurs données suggèrent en réalité que de telles erreurs orthographiques chez des adultes pourraient souvent davantage refléter un stockage lexical erroné plutôt que l'utilisation de la voie sous-lexicale ou phonologique (Bonin et al., 2001b; Holmes & Carruthers, 1998). Dans ce cas-là, l'effet de la consistance orthographique serait intervenu en amont, par un renforcement de manière progressive d'une erreur initiale répétée au fil du temps (Bonin et al., 2008). Nous n'avons pas contrôlé cette possibilité (en faisant par exemple écrire plusieurs fois les mêmes mots) et il n'est donc pas possible de réellement conclure que les effets de l'inconsistance sur les erreurs relevaient d'une influence phonologique au moment même de la production. L'analyse de la dynamique de celle-ci devrait nous en apprendre davantage sur ce point.

III.4.1.2. *Les limites de notre approche*

La fréquence d'usage d'unités aussi restreintes que celles que nous avons utilisées pour calculer la consistance (phonèmes individuels) est bien sûr insuffisante pour expliquer toutes les erreurs orthographiques phonologiquement plausibles. La graphie la plus probable pour un phonème donné n'est pas systématiquement celle utilisée par les sujets en remplacement d'une graphie plus rare. On observe parfois de plus certaines anomalies difficilement explicables selon l'approche de la consistance : le phonème /a/ dans le mot *arche* a été orthographié {ha} par 4 participants (soit un delta de consistance de -0,93). Ce type d'erreur relève vraisemblablement d'un effet de voisinage phonologique avec le mot *hache*, plus fréquent dans la langue. Du fait de nous être restreints à des mesures sur un seul phonème, certain biais peuvent en outre survenir au niveau du calcul de la consistance. Par exemple la graphie mesurée comme la plus consistante pour le phonème /ɛ̃/ sur la finale est {en} (la deuxième étant {in}). Ceci résulte d'une forte

représentation des mots comportant le suffixe {ien} (e.g. *mécanicien*, *alsacien*, etc.) de structure phonologique –YV (semi-voyelle–voyelle) il est probable que nous aurions obtenu des résultats différents pour le même phonème en ne considérant que les mots ayant une finale de structure –CV (consonne–voyelle, e.g. *matin*, *divin*, etc.). Les connaissances implicites de telles régularités ou contraintes graphotactiques (e.g. ici, la graphie {en} pour le phonème /ɛ̃/ en finale d'une structure –CV est quasiment inexistante en français), sont bien sûr utilisées par les scripteurs (e.g. Pacton, Fayol, & Lété, 2008; Pacton, Fayol, & Perruchet, 2005) mais encore assez mal modélisées par l'approche de consistance utilisée ici. Des mesures plus abouties de la consistance, si elles doivent bien se baser sur un échantillon très important de mots et différer selon la position de l'unité dans le mot, devront donc aussi intégrer ce type de phénomènes liés à la structure phonologique (e.g. tel que réalisé par Peereboom & Content, 1999 sur des monosyllabiques) ainsi que prendre en compte les effets liés à la structure syllabiques et au nombre de syllabes des mots considérés (cf. Introduction; travaux de Soum, 1997).

III.4.2. Consistance et dynamique de la production écrite

III.4.2.1. Le coût de l'inconsistance en fonction de sa position

L'analyse des latences d'écriture a tout d'abord révélé, comme lors de notre première expérimentation, que la présence d'une inconsistance ou irrégularité dans un mot n'est pas suffisante pour provoquer un délai supplémentaire dans le déclenchement de la réponse : si celle-ci est présente à la fin du mot elle n'a aucun effet ; au contraire, lorsque l'inconsistance est présente dans le premier phonème du mot, on observe un effet perturbateur massif sur les latences. Ensuite, l'analyse des vitesses moyennes d'écriture a révélé un pattern inverse, avec un effet perturbateur de la présence d'une séquence inconsistante uniquement lorsque présente à la fin du mot (se traduisant par un ralentissement), faisant écho à l'augmentation des durées d'écriture des mots inconsistants rapportée par Delattre et al. (2006). Un effet principal qui ne semble pas interagir ni avec la longueur des mots (1, 2 ou 3 syllabes), ni avec la nature consistante ou inconsistante de l'initiale. Tout cela suggère donc que la perturbation causée par la présence d'une « irrégularité à résoudre » (relevant du niveau de traitement central) surviendrait, logiquement, *avant* le déclenchement de la réponse lorsque celle-ci est sur l'initiale (i.e. augmentation des latences), mais *après* le déclenchement (périphérique, au cours de la production) lorsque celle-ci est sur la finale (i.e. réduction de la vitesse moyenne) ; ces résultats sont en contradiction avec l'hypothèse d'une exécution motrice « encapsulée ». De plus l'augmentation du nombre de syllabes du mot à écrire ne se traduisait pas par une augmentation mécanique des latences (les monosyllabiques semblaient par d'ailleurs présenter un statut

particulier à ce niveau). Il est toutefois difficile de caractériser la nature de l'effet que nous obtenons sur la vitesse : répercussion d'un conflit central, se répercutant du fait de l'organisation « en cascade » des processus centraux et périphériques dans l'écriture (le « conflit » de fin de mot n'est pas totalement résolu au moment du déclenchement de la réponse ; planification très réduite) ou simple effet graphomoteur, purement périphérique, relevant de variables confondues.

Une première approche pour résoudre cette question a consisté à prendre en compte dans le modèle statistique la fréquence moyenne des bigrammes et des trigrammes de chaque mot (compte *token*) en tant que covariable. Une fréquence moyenne de bigrammes élevée dans la langue impliquant selon nous des suites de lettres écrites plus fréquemment et donc plus automatisées (indépendamment des liens phono-orthographiques qui les sous-tendent). Les résultats montrent en effet que la prise en compte d'une telle variable remet en question la présence d'un réel effet sur la vitesse d'écriture d'une inconsistance finale. Il reste cependant difficile de conclure du fait de probables corrélations entre la fréquence de bigrammes et la consistance orthographique (toutes deux sont calculées à partir de la fréquence lexicale du mot). En outre, l'effet (ralentissement de la vitesse en cas d'inconsistance finale) persistait sous la forme d'une tendance statistique ($p = .06$).

III.4.2.2. La « localisation » du coût périphérique d'une inconsistance finale, indépendamment de la longueur des mots

Puisque les tracés produits lors de l'écriture d'un mot sont toujours très différents en termes de durées et de distance, en fonction du nombre et de la forme des lettres de ce mot mais aussi en raison des styles d'écriture individuels particuliers, il peut être difficile d'obtenir une mesure objective de l'évolution de la vitesse du tracé indépendante du mot écrit et qui permette de réaliser des comparaisons. En plus de la mesure de vitesse moyenne par mot, nous avons donc proposé d'étudier ces profils d'évolution de la vitesse instantanée en les transformant dans un référentiel commun dépendant de la durée d'écriture de chaque mot. Au-delà des limites certaines inhérentes à cette approche (e.g. un même pourcentage de durée relève de réalités bien différentes selon le tracé considéré ; d'une portion de lettre à plusieurs lettres consécutives), nous considérons qu'elle permet une certaine localisation temporelle des éventuels effets utile à la compréhension des mécanismes cognitifs sous-jacents.

Pour répondre au problème de la nature de l'effet obtenu sur les vitesses moyennes d'écriture (i.e. ralentissement en cas d'inconsistance finale) et son implication sur l'architecture des modèles cognitifs de la production écrite, il est donc utile de tenter de le

localiser temporellement : ce ralentissement est-il global, sur toute la durée de la production, ou intervient-il à un moment particulier (e.g. par hypothèse, juste avant la production de la séquence inconsistante) ? Nous avons ainsi choisi de découper chaque production en 5 portions représentant chacune 20% de la durée d'écriture du mot. Il faut noter que cette vitesse moyenne par portion de durée ne concerne pas nécessairement uniquement la vitesse d'exécution du geste mais peut inclure d'éventuelles pauses à l'intérieur des mots. L'analyse des vitesses moyennes portion par portion confirme la présence d'un effet négatif de l'inconsistance finale et révèle que celui-ci semble principalement localisé sur le dernier cinquième de la durée de production (un effet était aussi présent sur le deuxième cinquième). Il est difficile de déterminer si un ralentissement aussi tardif, intervenant grossièrement pendant l'écriture de la séquence inconsistante, peut s'expliquer par la présence d'un conflit de niveau central, entre le produit des deux voies. On peut postuler qu'une persistance de l'activation d'une représentation issue de la voie phonologique cause ce ralentissement *pendant* la production de la représentation graphémique lexicale correcte (toutes les analyses portaient bien sur des productions correctes). La recherche de variables confondues qui, indépendamment de la nature phono-orthographique de la séquence produite, pourraient expliquer ce ralentissement final nous a donc amenés à prendre en compte la surreprésentation de la lettre {e} (en écriture cursive, boucle induisant une vitesse élevée) en dernière position dans les mots consistants sur la finale. L'effet de l'inconsistance finale sur la vitesse d'écriture de la dernière portion persiste malgré l'ajout d'une telle covariable, mais en est tout de même atténué (i.e. en prenant en compte les moyennes ajustées, il était de -0,23 cm/s contre -0,29 cm/s auparavant).

III.4.2.3. *Pas de réel coût périphérique de l'inconsistance finale sur les mono- et bisyllabiques ?*

Plusieurs travaux étudiant la dynamique de l'écriture chez l'enfant et chez l'adulte ont démontré que les syllabes pouvaient constituer des unités distinctes lors de la programmation et l'exécution du geste d'écriture (Kandel et al., 2006; Kandel et al., 2009; Lambert et al., 2008). Ainsi, bien que l'effet de l'inconsistance finale sur les vitesses moyennes ne semblait pas interagir avec la longueur des mots, il nous a semblé nécessaire de réaliser des analyses indépendantes sur les mots de 1, 2 ou 3 syllabes dans le but de mettre en évidence d'éventuels profils de vitesse différents. On peut en effet envisager que l'inconsistance finale ait eu un impact différent lorsqu'elle était située au sein de la même syllabe que l'inconsistance initiale (sur les mots monosyllabiques) que lorsqu'elles étaient au sein de syllabes distinctes (bi- et trisyllabiques). L'impact négatif de l'inconsistance finale sur la vitesse d'écriture de la fin du mot était en réalité présent sur les mots de 2 syllabes (en S5) et de 1 syllabe (en S4, et dans une

moindre mesure en S5). Pourtant ces effets étaient remis en cause par la simple prise en compte dans le modèle de la présence d'un {e} final, suggérant ainsi que l'effet sur la vitesse mis en évidence ne relèverait pas d'un conflit central (irrégularité phono-orthographique) mais plutôt de variables graphomotrices confondues difficilement contrôlables.

Il n'y avait donc pas d'effet périphérique fiable de la présence d'une inconsistance finale sur la production de mots de 1 ou de 2 syllabes. Cela semble s'accorder avec l'hypothèse d'une planification orthographique complète du mot avant son initialisation mais cela peut simplement signifier que la représentation orthographique lexicale a gagné la compétition avant même l'aboutissement de la voie phonologique et donc du conflit. La compétition entre les codes graphémiques issus de la voie phonologique et ceux issus de la voie lexicale ne jouerait que sur la planification de l'initiale du mot (délai sur les latences en cas de conflit). Une fois celle-ci résolue, la représentation orthographique lexicale serait sélectionnée et engagée. Selon cette proposition, les erreurs orthographiques en fin de mot relèveraient d'un stockage erroné dans le lexique plutôt que d'une influence phonologique.

III.4.2.4. Coût périphérique de l'inconsistance finale sur trisyllabiques : effet d'anticipation ?

Un phénomène différent semble se produire avec les mots de trois syllabes. L'effet apparaissait situé uniquement sur la séquence S2 ; l'examen visuel des courbes de vitesses instantanées suggère une vitesse plus faible entre les 10 et 40% de la durée (la durée de production moyenne des mots de 3 syllabes était de 3240 ms). C'est-à-dire globalement pendant l'écriture de la première syllabe lorsqu'une unité inconsistante était présente sur la troisième syllabe.

Selon la conception psychomotrice de Van Galen (1991), la durée d'écriture des lettres est le reflet d'une certaine charge cognitive au travers de différents niveaux de traitement actifs en parallèle pendant le geste d'écriture (niveaux sémantique, orthographique, de sélection des allographes, etc.). Kandel et al. ont en outre montré, en particulier lors de l'apprentissage de l'écriture chez l'enfant, que différentes sous-unités, telles que les, bigrammes ou graphèmes complexes, les syllabes et les morphèmes modulaient la réalisation du geste d'écriture (Kandel et al., 2006; Kandel et al., 2009; Kandel, Peereman, Grosjacques, & Fayol, 2011; Kandel & Spinelli, 2010; Kandel, Spinelli, Tremblay, Guerassimovitch, & Alvarez, 2012). On peut ainsi interpréter nos résultats en proposant que chez des adultes experts le ralentissement sur les mots de trois syllabes résulte d'une anticipation de la production de la dernière syllabe, pour laquelle un conflit persiste au niveau orthographique (se traduisant par une charge cognitive plus

importante), alors que les mots plus courts étaient produits de manière plus unitaire (tous les mots utilisés dans notre expérimentation étaient monomorphémiques).

III.4.2.5. Comparaison avec les travaux précédents

Si l'on ne tient pas compte de l'effet de la position de l'inconsistance, nos données sont plutôt en accord avec ceux de Delattre et al. (2006) : une inconsistance peut aussi bien affecter les latences que la vitesse d'écriture (ou que la durée d'écriture). Cependant, nous avons montré qu'il est nécessaire de réaliser des analyses plus détaillées, et de manipuler la position de l'irrégularité, pour pouvoir réellement conclure à la répercussion en cascade du conflit central. Comme nous l'avons déjà évoqué, un tel travail a récemment été rapporté par Roux et al. (2013) dans une tâche de copie (mots de 5-6 lettres, 1 ou 2 syllabes). Après avoir montré que la durée d'écriture moyenne des traits composant chaque lettre était plus longue pour les mots irréguliers, ils précisent que ce ralentissement était présent sur la lettre initiale en cas d'irrégularité au début du mot, mais tout au long du mot en cas d'irrégularité finale. Étonnamment, aucun effet sur les latences de la présence de l'irrégularité n'était obtenu. De notre côté, la nature consistante ou inconsistante de l'initiale du mot avait un fort impact sur les latences mais pas d'effet sur la vitesse d'écriture de ce début de mot (i.e. initiale de mots comme « phase » (inconsistant) ou « falaise » (consistant)). On peut ainsi postuler que la tâche de dictée que nous avons utilisé favorise l'activation précoce des codes phonologiques, provoquant très rapidement un conflit lors de la présentation du stimulus, devant être résolu avant l'initialisation de la réponse (délai dans les latences, aucun effet sur la vitesse d'écriture de l'initiale du mot).

L'effet phonologique précoce sur les latences s'accorde avec certains effets d'amorçage observés lors de l'écriture en présence d'un distracteur ; les réponses sont facilitées lorsque le distracteur phonologique apparaît au même moment que la cible (SOA de 0 ms) ce qui n'est pas le cas si celui-ci apparaît plus tardivement (SOA de +200 ms) (Zhang & Damian, 2010). La tâche de copie utilisée par Roux et al. (2013) a elle plutôt favorisé un encodage orthographique précoce, l'influence de voie phonologique ne se faisant ressentir qu'après l'initialisation (pas d'effet sur les latences, ralentissement de la vitesse d'écriture de la première lettre du mot). Il faut en outre noter que la séquence irrégulière dans ce travail ne concernait pas nécessairement la première lettre, dont la durée d'écriture était influencée, mais pouvait porter, tout en étant située au début du mot, sur les lettres suivantes. Il restait donc possible d'initier la réponse, de produire la première lettre, quand bien même l'irrégularité n'était pas résolue. Ce qui n'était pas le cas dans notre étude (l'inconsistance initiale était confondue avec le graphème initial).

III.5. Conclusion

Les effets sur la dynamique de la production écrite de la présence d'une inconsistance portant spécifiquement sur l'unité initiale d'un mot indiquent une résolution du conflit avant le déclenchement de la réponse : une augmentation des latences lorsque le premier graphème activé via la voie de conversion ne correspond pas au premier graphème du mot sélectionné via la voie lexicale. On observe ensuite que la présence d'une inconsistance finale n'a aucun effet perturbateur sur ces latences, qui ne sont pas rallongées non plus par l'augmentation du nombre de lettres ou de syllabes du mot à écrire (les latences auraient en effet tendance à être plus longues pour les mots plus courts). On peut en déduire un certain traitement en parallèle des étapes centrales et périphériques pendant l'écriture du mot, la production débute avant la planification du mot entier. L'encodage périphérique du reste du mot, de sélection des allographes et des schèmes moteurs, peut survenir en parallèle pendant l'exécution motrice. Dans la mesure où des effets perturbateurs sur la vitesse associés à la présence d'une inconsistance finale sont observables ; que ce soit au niveau de cette inconsistance (effet peu concluant) ou, pour des mots plus longs, en amont, nos résultats sont plutôt en faveur d'une répercussion, en cascade, du conflit central (lié à l'activation de la voie phonologique) sur l'exécution motrice lors de l'écriture usuelle, tel que l'ont observé Roux et al. (2013) dans une tâche de copie utilisant l'écriture en majuscules d'imprimerie. Les étapes périphériques ne seraient pas des processus encapsulés dont le rôle serait de convertir une séquence graphémique complète et aboutie en un tracé graphique mais travailleraient plutôt à transcrire, au fur et à mesure, une représentation graphémique non complètement déterminée et susceptible d'être encore influencée par le déroulement de la procédure de conversion phono-orthographique.

CHAPITRE VI : META-ANALYSE DES TRAVAUX SUR L'ÉCRITURE EN NEUROIMAGERIE

PREAMBULE

Nous avons évoqué dans les parties introductives de ce travail qu'un certain nombre de travaux avaient été conduits en neuroimagerie fonctionnelle chez le sujet sain (IRMf et PET) visant à mettre en évidence les différentes composantes du réseau d'aires cérébrales impliquées dans le processus de production du langage écrit. Ces travaux sont pour l'essentiel récents, et restent peu nombreux, mais ont déjà permis de confirmer l'implication cruciale de plusieurs aires auparavant identifiées via la méthode anatomo-clinique ou les études neuropsychologiques modernes. Pourtant, même si certains invariants semblent se dégager de ces études en neuroimagerie, tels que l'activation du cortex frontal et pariétal supérieur, les objectifs de ces travaux sont variés et les résultats rapportés sont parfois contradictoires, ou du moins différent (e.g. rôle crucial ou annexe du gyrus supramarginal, centre frontal de l'écriture dans le cortex prémoteur ventral ou supérieur, rôle du gyrus angulaire, activations de l'hémisphère droit, etc.). Une telle hétérogénéité reflète naturellement la diversité des méthodologies ou paradigmes employés, utilisant des tâches expérimentales différentes (e.g. écriture sous dictée avec un stylo, dénomination d'image en traçant les lettres avec le doigt dans les airs), des tâches contrôles différentes (e.g. répétition à l'oral un mot entendu, traçages de cercles), voire des systèmes d'écriture différents (e.g. caractères alphabétiques, Kanjis japonais). Il nous a cependant semblé que la quantité d'études publiées était aujourd'hui suffisante pour tenter de les intégrer afin d'en extraire les résultats communs et en discuter les divergences. En ce sens la diversité des paradigmes apparaît plutôt comme un atout.

Ce travail a ainsi consisté à identifier et regrouper les travaux disponibles, de la manière la plus exhaustive possible, dans lesquels des résultats d'activation en neuroimagerie fonctionnelle lors d'une tâche de production écrite étaient rapportés (avec des tables de coordonnées d'activation lors d'analyses cerveau-entier disponibles). Les coordonnées des pics d'activation publiées dans ces différentes études étaient recueillies et ensuite traitées via une méthode statistique quantitative, la méthode ALE (*Activation Likelihood Estimate*, ou estimation de la probabilité d'activation ; Turkeltaub, Eden, Jones, & Zeffiro, 2002). Cette méthode procède en plusieurs étapes pour aboutir à une sorte de carte d'activation des régions cérébrales les plus

fréquemment activées au travers du jeu de données inclus dans l'analyse. Elle procède tout d'abord par l'application d'une fonction gaussienne centrée sur les coordonnées de chaque pic d'activation donné, selon une valeur FWHM (*Full Width at Half Maximum*) déterminée par le nombre de sujets inclus dans l'étude d'où ce pic provient (modélisant ainsi de façon probabiliste l'incertitude de sa localisation). La combinaison de ces probabilités par pic et par étude, permet d'attribuer une valeur ALE à chaque voxel dans une image de cerveau 3D standardisée. La significativité des scores ALE est ensuite testée via une méthode comportant de multiples itérations, comparant la carte ALE obtenue à des cartes obtenues de manière aléatoire (hypothèse nulle d'indépendance spatiale des coordonnées d'activation entre chaque étude).

Afin d'être en mesure de discuter les résultats (i.e. réseau cérébral global de l'écriture manuscrite) en termes de processus cognitifs sous-tendus par chacune des différentes composantes de réseau (i.e. processus linguistiques/centraux, ou moteurs/périphériques), une classification des contrastes était préalablement réalisée et utilisée pour réaliser des analyses ALE complémentaires. La distinction qui a été utilisée pour cette classification était essentiellement basée sur le type de tâche contrôlée utilisée dans les différents contrastes : le contraste rapporté contrôlait-il pour les processus non spécifiques de traitement de l'entrée (e.g. dénomination écrite vs. dénomination orale) ou pour les processus non spécifiques d'exécution de la sortie (e.g. dénomination écrite vs. traçage de boucles) ? Cette distinction, qui ne tient pas compte dans un cas de la nature de la sortie et dans l'autre du type d'entrée linguistique a été utilisée car elle reproduit le schéma expérimental des travaux visant à identifier les aires les plus spécifiques de l'écriture (cf. Chapitre II) et car elle permet de maximiser le nombre de contrastes inclus dans chaque analyse. Les résultats obtenus nous ont ainsi permis de valider des hypothèses quant au rôle crucial de certaines régions dans le processus d'écriture et d'identifier plusieurs aires apportant leur contribution, de manière partagée avec d'autres compétences linguistiques (e.g. parole) ou motrices (e.g. dessin).

Ce travail de méta-analyse et de revue de la littérature a fait l'objet d'une publication dans le numéro 49 (10) de la revue *Cortex* (Planton, Jucla, Roux, & Demonet, 2013). Il est présenté ici tel qu'il a été publié.



Research report

The “handwriting brain”: A meta-analysis of neuroimaging studies of motor versus orthographic processes

Samuel Planton^{a,b,c,*}, Mélanie Jucla^c, Franck-Emmanuel Roux^{a,b} and Jean-François Démonet^d

^aINSERM, Imagerie Cérébrale et Handicaps Neurologiques UMRS 825, Toulouse, France

^bUniversité de Toulouse, UPS, Imagerie Cérébrale et Handicaps Neurologiques UMRS 825, CHU Purpan, Toulouse, France

^cURI Octogone (EA 4156), Université Toulouse II Le Mirail, Toulouse, France

^dCentre Leenaards de la Mémoire, CHUV & Université de Lausanne, Lausanne, Switzerland

ABSTRACT

Introduction: Handwriting is a modality of language production whose cerebral substrates remain poorly known although the existence of specific regions is postulated. The description of brain damaged patients with agraphia and, more recently, several neuroimaging studies suggest the involvement of different brain regions. However, results vary with the methodological choices made and may not always discriminate between “writing-specific” and motor or linguistic processes shared with other abilities. **Methods:** We used the “Activation Likelihood Estimate” (ALE) meta-analytical method to identify the cerebral network of areas commonly activated during handwriting in 18 neuroimaging studies published in the literature. Included contrasts were also classified according to the control tasks used, whether non-specific motor/output-control or linguistic/input-control. These data were included in two secondary meta-analyses in order to reveal the functional role of the different areas of this network. **Results:** An extensive, mainly left-hemisphere network of 12 cortical and subcortical areas was obtained; three of which were considered as primarily writing-specific (left superior frontal sulcus/middle frontal gyrus area, left intraparietal sulcus/ superior parietal area, right cerebellum) while others related rather to non-specific motor (primary motor and sensorimotor cortex, supplementary motor area, thalamus and putamen) or linguistic processes (ventral premotor cortex, posterior/inferior temporal cortex). **Conclusions:** This meta-analysis provides a description of the cerebral network of handwriting as revealed by various types of neuroimaging experiments and confirms the crucial involvement of the left frontal and superior

parietal regions. These findings provide new insights into cognitive processes involved in handwriting and their cerebral substrates.

KEYWORDS

Handwriting; Spelling; Functional neuroimaging; Meta-analysis

I. INTRODUCTION

I.1. The “handwriting brain”

Writing is a major cultural invention and an everyday communication tool for mankind, the earliest forms of which date from approximately 6 thousand years ago. Writing to communicate has since played a central role in the dissemination of culture and concepts. Handwriting is the most common way of learning and using written language even though typing has now taken on a central role in western societies. Whatever the orthographic system, the process of writing implies the contribution of several cognitive and motor functions. A complex set of neural underpinnings support this highly specific skill.

Most of our knowledge of the neuroanatomy of writing comes from neuropsychological studies of dysgraphias or agraphias seen after some brain lesions or diseases. A variety of writing disabilities have been described, from dysorthographias, affecting lexical or phonological components – i.e. central processes – with relative preservation of letter formation, to apraxic agraphias, affecting grapheme tracing – i.e. peripheral processes (Roeltgen, 2003). Neuropsychological studies have suggested that lexical processes of writing relate to the angular gyrus (Roeltgen & Heilman, 1984) or the precentral gyrus (Rapcsak et al., 1988) and phonological processes to the left perisylvian regions (Alexander et al., 1992b; Rapcsak et al., 2009). The motor components are believed to be linked to the left superior parietal or premotor regions (Alexander et al., 1992a; Anderson et al., 1990; Auerbach & Alexander, 1981). However, these results suffer from the usual limitations of lesion-based studies: spontaneous lesions are variable, difficult to delineate and the lesion-symptom relationship may be strongly influenced by neural plasticity and functional recovery.

Compared to other language skills, writing has long been neglected in functional brain imaging studies of healthy subjects. It is therefore difficult to establish a neurofunctional model of typical writing skills that might match the results reported in the literature on agraphia. More recently, several imaging studies have aimed to localize brain areas implicated in spelling or handwriting. The aim of the present paper is to present a meta-analysis of functional imaging

studies reporting brain areas related specifically to handwriting and to isolate brain territories that characterize the written modality of language from those that also support other (motor or linguistic) abilities. Beyond the description of the network of brain areas involved, the importance of methodological aspects of these imaging experiments will be addressed.

A first meta-analysis has been recently provided by Purcell, Turkeltaub, Eden, et Rapp (2011b), who aimed to distinguish central and peripheral processes of spelling. Central writing processes refer to the retrieval of abstract orthographic word-forms, via orthographic lexicon or phoneme-to-grapheme conversion mechanisms, and their temporary storage in working memory (in the "graphemic buffer", see Hillis & Caramazza, 1989). Peripheral processes involve letter production (selection of allographs or letter-shape conversion processes), planning and ordering of the sequence of letters and execution of specific motor programs (Ellis, 1982). Purcell et al. (2011b) limited their data exploration to alphabetic writing systems, and the studies considered did not necessarily involve tasks requiring the actual production of script. They focused on tasks eliciting the activation of an orthographic representation of a word, for example deciding if a particular letter was present or not in a heard word or if different words were spelled the same. While rhyme spelling tasks or spelling judgement have been used to study central spelling processes, one may consider that such tasks stray too far from the processes involved in everyday handwriting and their brain substrates. Here, we rather aimed at identifying handwriting-specific processes allowing actual written production (with the exception of "mental writing" tasks). We included various writing conditions (writing from dictation, written naming, generative writing), and different writing codes, both alphabetic and ideographic (Japanese Kanji). We also considered results from experiments that were not necessarily designed to study the neural substrates of writing *per se* (e.g. word retrieval, handedness, creativity, comparison of different types of writing).

Word writing involves many processes such as analysis of the input sensory information (visual or auditory), access to the orthographic representation of the word to be written (either directly or via a sublexical processing; see Rapp et al., 2002, for an example of such a 'dual-route' model) and its temporary storage into the graphemic buffer. These central stage processes are followed by allographic processes, i.e. the specification of the format in which letter series will be produced, including the idiosyncratic way each individual actually produces graphic scripts, and this involves the programming and neuromuscular execution of appropriate motor sequences (Van Galen, 1991). As mentioned earlier, several of these processes are not specific to writing and can also be involved in other tasks, whether linguistic (e.g. reading) or motor (e.g. drawing). Neuroimaging studies should be able to disentangle writing/spelling processes (i.e. conceived as the preparation of a message and its conversion into a graphic form) from

unrelated input or linguistic processing, and from or non-specific motor movements. The interpretation of their results thus relies strongly on the understanding of the experimental and control tasks involved.

I.2. Controlling for motor response

A first objective in experiments involving handwriting gestures is to tease apart the respective influences on brain activation of finger/hand motor activity (holding pen, moving joints) and visuospatial control of these movements. The most relevant control task consists of drawing non-linguistic stimuli such as circles (e.g. Roux et al., 2009), abstract symbols (e.g. Omura et al., 2004) or pseudo-letters (e.g. Longcamp, Anton, Roth, & Velay, 2003). Yet another strategy is to attenuate the influence of the sensorimotor and visuospatial components in the experimental handwriting task itself. It is generally assumed that writing skills are independent of the tool or the effector since performance in agraphic patients is impaired regardless of the effector used. Some authors (especially in studies of the Japanese writing system) asked subjects to write with the finger on a board or in the air, with a limited amount of graphemes, thus removing the constraints of pen grasping (that implies maintaining adequate pressure on the paper and controlling the topokinetic aspects of the usual handwriting, i.e. the spatial dynamics of the hand in a delimited graphic space). 'Writing in the air' was used by Katanoda et al. (2001), in association with a visually-cued finger tapping task as a control matched in duration, speed and amplitude. Finally, another way to control for non-specific motor activity may be not to write at all (e.g. Harrington et al., 2007). These authors asked their subjects to mentally draw or write the name of a visually presented object. Although it is very difficult to control the subject's activity during the task, this approach seems to be valid since the only difference of activation reported with a second condition of actual writing was located in the motor cortex. The comparison between studies that involve sensorimotor control tasks and those not involving such control may reveal which area in the handwriting brain network is really specific to writing and which ones are not i.e. support non-specific or motor-related functions.

I.3. Controlling for linguistic/input processes

As stated by cognitive models (i.e. Ellis, 1982; Rapp et al., 2002), handwriting tasks may involve many processes starting by the analysis of the input sensory information (either visual as in word copy or auditive as in dictation), its processing through a visual analysis system and an orthographic input lexicon (visual input) or through a phonological input lexicon (auditive

input), allowing access to the semantic system integrating knowledge about the item. Control tasks are also designed to manage such linguistic aspects of writing or processes intervening up to the writing stage. An overt oral or subvocal naming task has often been chosen to isolate linguistic processes specific to written naming (e.g. Sugihara et al., 2006), often assuming that written naming of a (visually presented) item necessarily implies prior covert oral naming. Subtracting the covert control naming from the writing condition would thus isolate activations specifically related to the “central” process of writing (i.e. orthographic and graphemic planning). The use of an oral task identical to the writing task seems to be a simple and valid approach to control for amodal central effects and isolate writing modality (for Brownsett & Wise, 2010). Motor activations related to oral articulation may also be further “suppressed” by using another control task (such as meaningless syllable repetition; Roux et al., 2009). Input-matched conditions, in which the same stimuli as in the writing task are presented (written or aurally presented words, pictures) are obviously the simplest way to abstract from sensorial, but also linguistic (i.e. to process the stimulus), brain functions. Here again, the results from comparing experiments which did or did not manage these issues may isolate writing specific areas in the writing network from non-specific linguistic areas. More focused studies aiming to specifically delineate writing-specific areas have used a combination of both kinds of control tasks; presentation of stimuli during both the written-spelling task and the motor control task (Rapp & Dufor, 2011; Segal & Petrides, 2012), or conjunction analyses (e.g. Katanoda et al., 2001). Sugihara et al. (2006) and Roux et al. (2009) chose to resort to a conjunction between the activations from a writing task with the right hand and a writing task with the left hand, in the same group of right-handed subjects. The resulting activity was considered as independent of the motor activity of the hand and as reflecting only a specific and critical process of handwriting.

Here, we used published data (as reported in tables of activated clusters) from papers identified in the current brain imaging literature. Studies were considered when they explicitly involved handwriting processes. Our general objective was to identify the areas commonly activated by tasks thought to involve the same psycholinguistic processes. As a first step, we aimed to identify the global brain network of regions activated across all studies and contrasts (through a quantitative method). Two secondary meta-analyses were then conducted to isolate brain regions arising from contrasts that controlled for non-specific motor or linguistic processes.

II. META-ANALYSIS

II.1. Materials & Method

II.1.1. Studies included

Given the relatively small number of imaging studies having a direct interest in writing as such, we included studies whose main objective may have been different but that reported at least one contrast involving written production. Thus, we considered experiments involving the graphic production of any linguistic content-element, i.e. from basic components such as the repeated production of a single letter, to elaborate productions such as a coherent narrative, with alphabetic, syllabic (e.g. Japanese Kana), or ideographic characters (e.g. Japanese Kanji), performed either with the usual pen and paper, or by keyboard typewriting, tracing with the finger in the air, or "imagined" writing. Articles were identified through the PubMed (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/>) and ScienceDirect (www.sciencedirect.com) bibliographic databases using the keywords 'spelling', 'writing', 'handwriting', and 'neuroimaging', 'functional imaging', 'fMRI', 'PET'. The studies used either fMRI or PET imaging and were published between 1995 and 2012. The languages studied were English, Japanese, German, French and Czech. Only studies involving healthy participants were selected. Of the 24 neuroimaging studies initially identified, 18 published full tables of activation peak coordinates and were therefore included in the meta-analysis dataset (unpublished data tables from Roux et al.; 2009, were additionally included).

Table VI-1 : Summary of studies and contrasts included in the meta-analysis

Voir Annexe 3

II.1.2. Categorization of contrasts

From each study, we included all activation peak coordinates reported in contrasted tasks implying a writing task, without any a priori selection. Two or more contrasts could therefore be included from a single study (see Table VI-1 for a description of the contrasts included). The number of foci in a given study ranged from 3 to 29, with a total of 462 reported foci from 36 different contrasts (see Figure VI-1). A total of 229 subjects were involved. We classified contrasts according to whether or not they involved control for a given cognitive process. "Motor output control" typically refers to contrasts in which the experimental writing task was compared to a control task involving a non-linguistic motor task while "Linguistic/input control"

means that the experimental writing task was compared to a linguistic task or a task equivalent in terms of stimuli or sensorial input (e.g. written naming vs. subvocal naming).

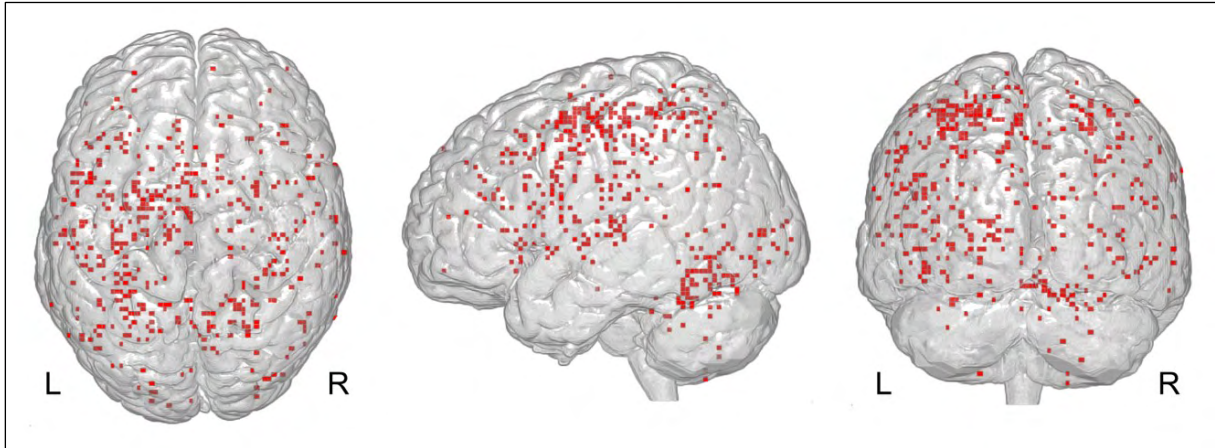


Figure VI-1 : Overview of the 462 foci used to conduct the main ALE analysis projected on a “glass brain” rendered template; from the left to the right : top, lateral left and back view.

The diagram in Figure VI-2 shows a simplified model summarizing the different cognitive processes that are theoretically included or excluded in the various considered writing tasks and contrasts. It is noteworthy that contrasts hereafter referred as “motor output controlled” may control motor output to varying degrees, from only aspecific movements (e.g. finger tapping) up to actual graphomotor production (e.g. loops tracing with a pen). In the same way, linguistic control tasks may control for more than only input processing, since they also involve phonological or even orthographic computations.

Such distinction based on the nature of control tasks involved was made in order to highlight the variations in the observed writing network and the common core of writing-specific processes (i.e. transcription between orthography and motor patterns). It also allows to include in the meta-analyses a sufficient number of studies to provide valid results.

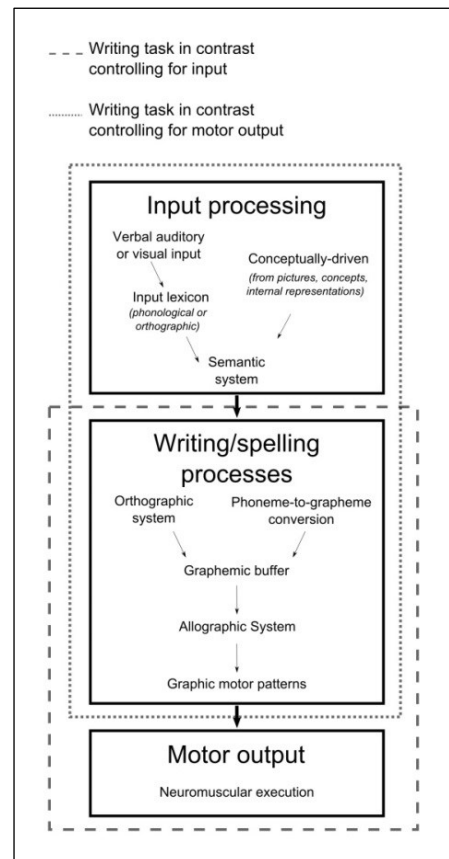


Figure VI-2 : Schematic representation of the different cognitive processes involved in handwritten tasks used in neuroimaging.

II.1.3. ALE method

In order to identify the areas constituting the brain network conjointly involved in all included contrasts, a probabilistic whole-brain map was constructed using the “Activation Likelihood Estimate” (ALE) method (Turkeltaub et al., 2002), implemented in the GingerALE 2.1 software package (www.brainmap.org/ale) (Eickhoff et al., 2009). When necessary, activation peak coordinates were converted from the Talairach (Talairach & Tournoux, 1988) to the MNI reference space using the “tal2icbm” transformations (Lancaster et al., 2007) provided in the GingerALE software. The ALE analysis applies an FWHM value to each given local maximum (viewed as a localization probability distribution centred on its coordinates), based on the number of subjects in the corresponding study, and performs a test to determine the null distribution of the ALE statistic at each voxel (Laird et al., 2005). To compensate for the small number of studies and when applicable, we included more than one contrast per study. The ALE algorithm tended to minimize biases from the variability of the number of foci or the number of contrasts in each study (Turkeltaub et al., 2012). A threshold was then applied using the FDR algorithm with a chosen p value of 0.001 and a minimum cluster size of 100 mm³. The resulting whole-brain map was projected on a brain template standardized in the MNI reference system using the MRICron software (<http://www.cabiatl.com/mricron/>); (Rorden & Brett, 2000).

II.1.4. Identification of the areas of interest and secondary analyses

Clusters from the ALE map were not necessarily sufficient to reliably segregate the different areas. For example, it could yield a large fronto-parietal cluster encompassing numerous foci. The coordinates of local maxima in each cluster from the ALE analysis, together with specific anatomical boundaries (e.g. central sulcus) were thus used to isolate each area of interest. Anatomical labelling was performed using Talairach Client (version 2.4.2; <http://www.talairach.org/>) (Lancaster et al., 2000). For each area of interest, tasks and contrast components were considered to put forward conjectures about the function of a given area (see discussion).

II.1.5. Secondary analyses

Two secondary ALE analyses using the same parameters were performed, considering either only contrasts that controlled for motor output (and not necessarily for verbal input) (218

foci from 17 contrasts) or only contrasts that controlled for linguistic or verbal input (and not necessarily for motor output) (238 foci from 23 contrasts).

Contrasts controlling for both motor output and linguistic inputs (i.e. often designed to identify “writing-specific” processes) were included in both these secondary analyses (particularly to avoid biases due to low sampling). The comparison between them should therefore be treated with caution, given that they include common data sources (and thus strengthen the influence of writing-specific regions).

II.2. Results

We identified 12 regions from the main ALE meta-analysis, distributed in 10 clusters and 21 local maxima (peaks), constituting an extensive brain network of writing (encompassing all included writing tasks and imaging contrasts). A whole-brain 3D representation of the ALE map can be seen in Figure VI-3. The first cluster (7944 mm³, weighted centre: -29, -21, 56) covered a large fronto-parietal area that we assumed to be composed of 3 distinct functional regions (based on anatomical landmarks or Brodmann areas): left superior frontal area (middle frontal gyrus, MFG; superior frontal sulcus, SFS: 2 peaks); left superior parietal area (inferior parietal lobule, IPL; superior parietal lobule, SPL; intraparietal sulcus, IPS: 3 peaks) and primary motor and sensorimotor cortex (M1/SM1: 3 peaks). Nine other clusters were located, in order of importance (i.e. from the largest to the smallest cluster size), in the supplementary (SMA) and pre-supplementary (pre-SMA) motor areas (1784 mm³, weighted centre: -4, -7, 52; 2 peaks), right anterior cerebellum (1288 mm³, weighted centre: 18, -52, -22; 1 peak), left posterior nucleus of thalamus (pulvinar; 1248 mm³, weighted centre: -14, -22, 6; 1 peak), left precentral gyrus (preCG) /inferior frontal gyrus (IFG) (1144 mm³, weighted centre: -50, 7, 27), right posterior cerebellum (816 mm³, weighted centre: 5, -68, -17; 2 peaks), right superior frontal cortex (376 mm³, weighted centre: 26, 0, 53; 1 peak), right inferior parietal lobule (IPL; 160 mm³, weighted centre: 41, -33, 46), left fusiform gyrus (128 mm³, weighted centre: -44, -62, -11) and left putamen (104 mm³, weighted centre: -27, -6, 1). A list of peaks from this ALE map is given in Table VI-2.

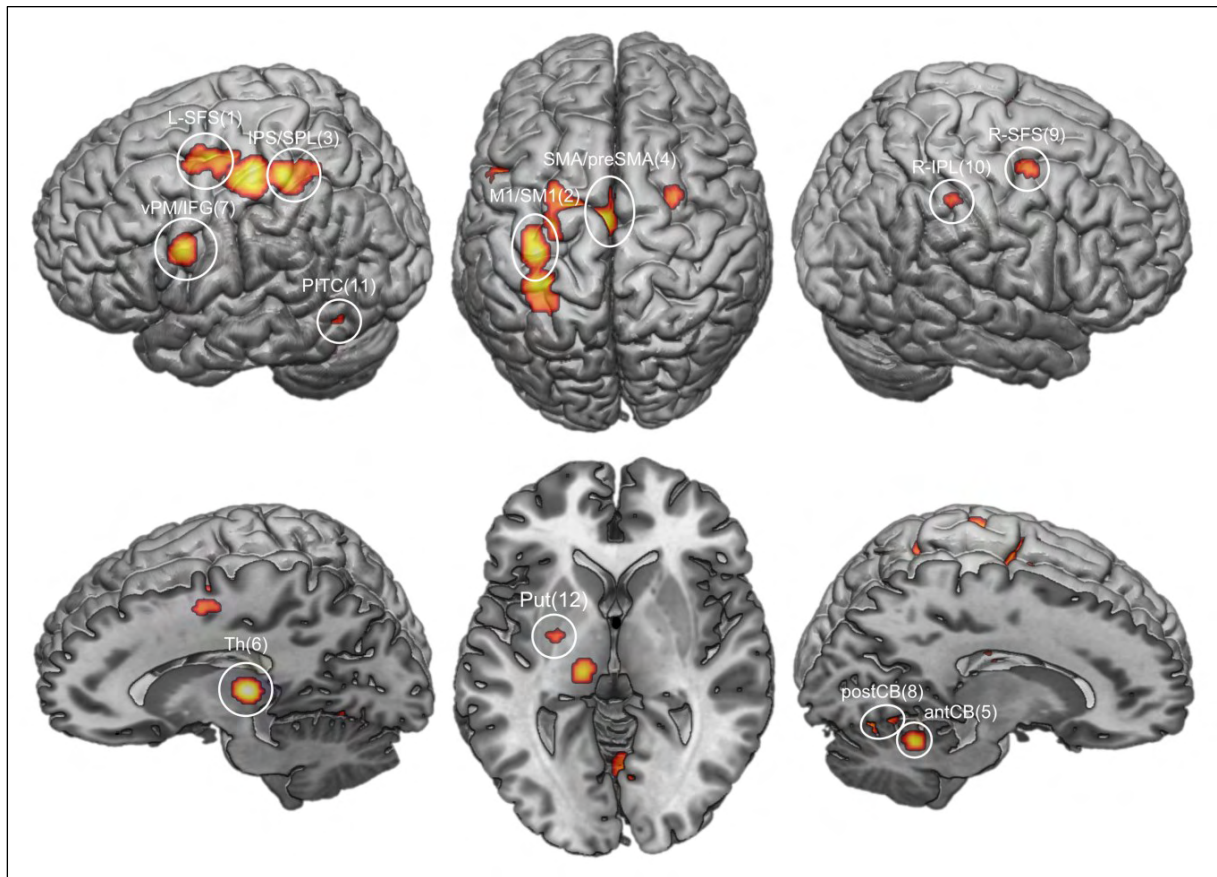


Figure VI-3 : Results of the ALE meta-analysis conducted with all the contrasts, projected on a standard rendered template. Areas of interest are numbered according to their rank in the meta-analysis results (cluster size and ALE value). 1. left frontal superior sulcus area (L-SFS); 2. primary motor/sensorimotor area (M1/SM1); 3. left superior parietal area (IPS, intraparietal sulcus; SPL, superior parietal lobule); 4. supplementary and pre-supplementary motor area (SMA, pre-SMA); 5. anterior cerebellum (antCB); 6. thalamus (Th); 7. left inferior frontal /premotor area (vPM, ventral premotor cortex; IFG, inferior frontal gyrus); 8. posterior cerebellum (postCB); 9. right superior frontal area (R-SFS, right superior frontal sulcus); 10. right inferior parietal lobule (R-IPL); 11. posterior/inferior temporal cortex (PITC); 12. putamen (Put).

Table VI-2 : List of significant peaks from the main ALE analysis performed with all included contrasts

Peak location		All contrasts			Corresponding functional region (see Figure VI-3)	
		ALE Value (x 10 ⁻³)	MNI coordinates			
			x	y		z
FRONTAL						
Left	Middle frontal gyrus (BA6)	38.0	-22	-8	54	<i>L-SFS (1)</i>
	Middle frontal gyrus (BA6)	24.2	-26	2	58	
	Precentral gyrus (BA4)	34.7	-34	-24	60	<i>M1/SM1 (2)</i>
	Postcentral gyrus (BA3)	33.6	-36	-24	54	
	Precentral gyrus (BA4)	29.8	-36	-18	56	<i>SMA/preSMA (4)</i>
	Medial frontal gyrus (BA6)	32.7	-4	-10	52	
	Medial frontal gyrus (BA6)	19.8	-4	4	52	
		Precentral gyrus (BA6)	29.3	-50	6	26
Right	Superior frontal gyrus (BA6)	22.6	26	0	54	<i>R-SFS (9)</i>
PARIETAL						
Left	Inferior parietal lobule (BA40)	31.9	-32	-38	56	<i>IPS/SPL (3)</i>
	Superior parietal lobule (BA7)	22.0	-32	-46	58	
	Superior parietal lobule (BA7)	19.3	-26	-52	54	
Right	Inferior parietal lobule (BA40)	19.8	40	-32	46	<i>R-IPL (10)</i>
TEMPORAL						
Left	Fusiform gyrus (BA37)	18.7	-46	-62	-12	<i>PITC (11)</i>
CEREBELLUM						
Right	Anterior lobe	38.7	18	-52	-22	<i>antCB (5)</i>
	Posterior lobe	23.0	4	-66	-16	<i>postCB (8)</i>
	Posterior lobe	22.7	6	-72	-18	
SUB-CORTICAL						
Left	Thalamus (pulvinar)	38.4	-14	-22	6	<i>Th (6)</i>
	Putamen	18.7	-26	-6	0	<i>Put (12)</i>

Secondary ALE analysis with only “motor output controlled” contrasts resulted in 5 peaks, all of which corresponded to areas of interest from the main analysis: two peaks in the left MFG/SFS area, one peak in the left ventral premotor/IFG region, one peak in the left IPL and one peak in the right cerebellum. ALE analysis with only “linguistic/input controlled” contrasts resulted in 7 peaks located in: left MFG/SFS area, M1/SM1 area, SMA, left IPL, anterior and posterior cerebellum, and thalamus. Lists of peaks from these two analyses are presented in Table VI-3 and

Table VI-4, and Figure VI-4 illustrates their comparison. It can be observed that only 3 areas reached significance in both of the secondary analyses: the left SFS/MFG area, left intraparietal sulcus/ superior parietal area and anterior cerebellum.

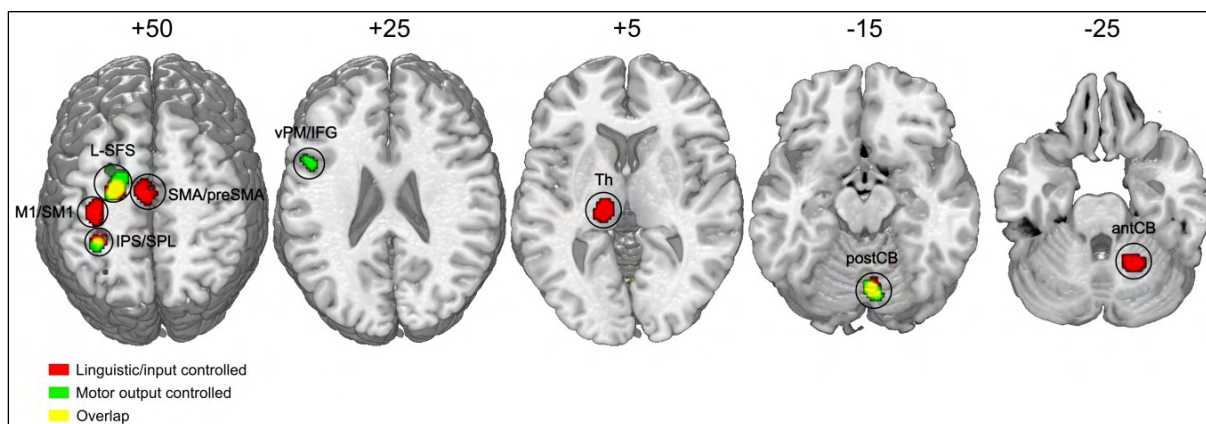


Figure VI-4 : Selected axial slices illustrating the differences between ALE secondary analyses performed with contrasts having controlled for verbal or linguistic input (red) and motor output (green). Overlap is shown in yellow.

Table VI-3 : List of significant peaks from the secondary ALE analysis including only contrasts controlling for motor output

Peak location	ALE Value ($\times 10^{-3}$)	Motor output controlled			Corresponding functional region (see Figure VI-3)	
		MNI coordinates				
		x	y	z		
FRONTAL						
Left	Middle frontal gyrus (BA6)	23.5	-22	-8	52	L-SFS (1)
	Middle frontal gyrus (BA6)	21.7	-26	2	58	
	Precentral gyrus (BA6)	15.7	-48	6	28	vPM/IFG (5)
PARIETAL						
Left	Inferior parietal lobule (BA40)	17.2	-34	-42	50	aIPS/SPL (3)
CEREBELLUM						
Right	Posterior lobe	20.8	4	-70	-16	postCB (8)

Table VI-4 : List of significant peaks from the secondary ALE analysis including only contrasts controlling for linguistic or sensorial input

Peak location	ALE Value ($\times 10^{-3}$)	Linguistic/input controlled			Corresponding functional region (see Figure VI-3)	
		MNI coordinates				
		x	y	z		
FRONTAL						
Left	Middle frontal gyrus (BA6)	27.7	-22	-10	54	L-SFS (1)
	Precentral gyrus (BA4)	25.7	-34	-26	60	M1/SM1 (2)
	Medial frontal gyrus (BA6)	29.0	-4	-12	52	SMA/preSMA (4)
PARIETAL						
Left	Inferior parietal lobule (BA40)	26.8	-32	-38	56	aIPS/SPL (3)
CEREBELLUM						
Right	Anterior lobe	31.8	18	-52	-24	antCB (6)
	Posterior lobe	20.2	4	-68	-16	postCB (8)
SUB-CORTICAL						
Left	Thalamus (pulvinar)	26.8	-14	-22	6	Th (7)

III. DISCUSSION

Results from the main meta-analysis allowed us to identify 12 cortical and sub-cortical functional regions involved to different degrees in written spelling tasks. Some of them were also present in the results of the secondary analyses conducted to distinguish a general writing network from non-specific input and output confounds. In an attempt to clarify the role of each component of this cerebral network, we will discuss these results with respect to the experimental contrasts and studies involved in order to propose a global framework of the neuroanatomy of handwriting.

III.1. Writing “specific” areas

The data collected indicate that three regions remain reliably and repetitively activated during handwriting whatever the nature of the control tasks used (motor or linguistic): left SFS/MFG area, left intraparietal sulcus/ superior parietal area and anterior cerebellum (see Figure VI-4). Thus, we can presume that they support cognitive processes specific or at least crucial to handwriting. This is in line with Sugihara et al. (2006) who identified the posterior end of superior frontal gyrus (SFG) and anterior part of left intraparietal sulcus (IPS) as the central processes of writing (i.e. “writing centres”). Nevertheless, the issue of the particular role of these areas and their actual specificity to written language remains.

III.1.1. Handwriting and superior parietal cortex

Peaks of activation in the parietal cortex (around the intraparietal sulcus; IPS) of the language dominant hemisphere (i.e. left for right-handers) are repeatedly reported ($x = -32$, $y = -38$, $z = 56$; area 3 in Figure VI-3). A first argument for the crucial role of this region in writing comes from the fact that its activation is found in various written spelling tasks (pen and paper, finger writing, typewriting, “imagined” writing, with or without visual feedback) and with different control conditions (motor or linguistic) or languages studied (its activation is likewise common to imagined writing of Japanese Kana phonograms and Kanji ideograms (Tokunaga et al., 1999). The posterior part of the IPS also shows the major peak of activity in the dorsal stream of the network involved in writing, whether it concerns coherent narratives or single graphemes, as described recently by Brownsett et Wise (2010). Furthermore, it is one of the common peaks remaining in both secondary meta-analyses (i.e. when controlling for either

linguistic/input related or motor output related processes); it frequently remains activated within single contrasts or conjunction contrasts controlling for both input and motor output.

In a neuroanatomical perspective, this region appears to be located at the intersection of the IPS and the postcentral sulcus and includes peaks located in the inferior parietal lobule (IPL, BA40), superior parietal lobule (SPL, BA7) and postcentral gyrus. There is, however, great variability in the location of the peaks reported in the studies (from -47 mm to -24 mm in x, from -52 mm to -30 mm in y and from 48 mm to 60 mm in z) and no clear functional distinction can be made between different clusters within this set that would result from the specific tasks and contrasts used. This may be related to functional heterogeneity or to high interindividual variability in the location of the left parietal “writing centre”, as reported by Sugihara et al. (2006).

Knowledge of the involvement of this area in handwriting does not come primarily from neuroimaging studies. Numerous agraphias described in the literature resulted from focal lesions in the left parietal cortex around the IPS; both in SPL (BA7) and IPL (BA40), including the supramarginal gyrus and angular gyrus. SPL lesions have been particularly associated with pure agraphia or apraxic agraphia (Alexander et al., 1992a; Auerbach & Alexander, 1981), a writing deficit characterized by poor letter formation in the absence of non-specific motor or sensorimotor deficit. Such lesions have also been shown to produce more subtle handwriting deficits, such as modifications in the natural serial order of strokes in a grapheme, reflecting a motor programming problem (Scarone et al., 2009).

Regarding its alleged function, the superior parietal cortex has been proposed as a graphemic area “where visuokinesthetic and sequential motor engrams for letters and words are stored” (Sakurai et al., 2007). This hypothesis is consistent with a central role in writing, independently of the specificities of the output (writing with finger or other tool, with left or right hand) or its content (from a single character to a complex narrative). Such a role is also consistent with the function of sensorimotor integration generally attributed to the posterior parietal lobe, particularly in the context of goal-directed movement (Andersen, Snyder, Bradley, & Xing, 1997). Rapp et Dufor (2011) report that the SPL was activated in their writing task but not in a spelling task focusing on central spelling processes from a previous work (Rapp & Lipka, 2011). Its role therefore seems to be related to the “representation, serial selection and production of letter shapes”. However, Magrassi et al. (2010) argue that this area is also important in more linguistic processes of writing. They observed that direct electrical cortical stimulation of the anterior SPL of a patient during writing under dictation induced not only graphemic errors but also lexical spelling errors. This would indicate that this area is not only engaged at a pre-motor level but could also interact with more inferior peri-sylvian regions

concerned with lexical processes. This issue was investigated further through the study of its interactions with other writing-related areas, using functional connectivity. Segal et Petrides (2012) showed that the rostral part of the SPL (area PE) interacted with the superior temporal gyrus (STG), the anterior supramarginal gyrus or motor/sensorimotor cortex during a written naming task, while interacted with the angular gyrus (AG) or Broca's region during word copying. We can thus finally assume that the superior parietal cortex may be particularly involved in the selection or representation of letter shapes but, more specifically, plays a role of a high-level interface between motor and language areas during the act of writing.

III.1.2. Left frontal superior writing centre

The frontal lobe area that seems the most repeatedly activated during writing across the different studies considered here is located in the left premotor cortex (BA6), in the posterior part of the middle frontal gyrus (MFG) (centred on MNI coordinates $x = -22, y = -8, z = 54$, area 1 in Figure VI-3), around the intersection of the superior frontal sulcus (SFS) and the precentral sulcus (preCS) (area 1 on Figure VI-3). This region corresponds to the peak with highest ALE value in the results of the main meta-analysis and is also present in both secondary ones. It thus appears as the area of strongest and most reliable activity during handwriting.

This area is usually referred to Exner's area (traditionally located in the posterior part of the middle frontal gyrus, see Roux et al., 2010) and is generally described as a major "writing centre", an area specifically involved in writing. It is found to be activated in all studies designed to isolate areas related to writing from (i) central, linguistic processes (common with oral naming) and (ii) peripheral sensorimotor processes related to finger or hand movements (Katanoda et al., 2001; Rapp & Dufor, 2011; Roux et al., 2009; Segal & Petrides, 2012; Sugihara et al., 2006). Like the superior parietal area, this frontal premotor area can also be found to be activated when a writing task is contrasted only with naming or drawing tasks (as in Longcamp et al., 2003; not included in the meta-analysis dataset), or even with a baseline passive vision or auditory condition. Our results seem to show that two distinct peaks are present and one of them is absent in the "Linguistic/input controlled" analysis. We cannot conclude on whether separate functions rely on these two peaks or if the effect is simply one of general variability. Furthermore, the observation of such superior frontal peaks may not be always recognized by the study authors as resulting from a specific activity of spelling (as it may be included in a broader cluster also comprising the primary motor cortex, as can be seen in the global ALE map; Figure VI-3). This could be an explanation for the fact that the only superior frontal peak of activation reported by Brownsett et Wise (2010) as resulting from a contrast between tasks in

written mode compared to oral mode is located in the hand motor area. Moreover, this localization issue sheds light on another premotor area which may be accessorially involved in the writing tasks: the frontal eye fields. This area, responsible for the generation of saccadic eye movements, is indeed located in the same precentral sulcus region (Paus, 1996).

Despite these difficulties, the diversity of paradigms consistently leading to activation of this superior premotor area reinforces the assumption of its involvement in a specific process of hand-written spelling, independently of both semantic processing (naming control tasks) and motor execution itself (it also found activated during imagined writing). The role of Exner's area, first primarily associated with allographic processing (a lesion here primarily affects the formation of letters; Anderson et al., 1990; Exner, 1881; Roux et al., 2010) could therefore be redefined as an interface between orthographic or graphemic abstract representations and the generation of motor commands, as proposed by Roux et al. (2009), who named this area the GMFA ("Graphemic/Motor Frontal Area"). A similar hypothesis is also used by Purcell et al. (2011a) to explain the activation of this area in a typed-spelling task, thus implying quite a different, and bimanual, written spelling mode. In addition to such processes, another writing-specific component present in cognitive models of written spelling is the graphemic buffer (Hillis & Caramazza, 1989). The role of this processing stage is to hold the graphemic representation of a word during the execution of the written response. It can also be designated as an orthographic working memory. Although the lesions leading to a graphemic buffer syndrome are diverse and spread across the left frontal and parietal areas (Cloutman et al., 2009), the superior prefrontal area is a critical component of this network, as Rapp et Dufor (2011) recently demonstrated its sensitivity to word length (when controlling for the amount of motor activity).

III.1.3. Right cerebellum involvement

The majority of right cerebellum activation concerns the anterior cerebellum (approximately lobule V; peak on $x = 18, y = -52, z = -22$, area 5 on Figure VI-3), and posterior cerebellum (approximately lobule VI; two peaks on $x = 6, y = -72, z = -18$ and $x = 4, y = -66, z = -16$, area 8 on Figure VI-3). In the light of the meta-analyses results, it could be assigned to either the "writing-specific" or the "motor-related" sections of this report. Such activation is usually attributed to the motor control functions resulting from complex finger movements and these areas were described as primarily motor and sensorimotor-related in a meta-analysis of cerebellum activations covering various cognitive functions (Stoodley & Schmahmann, 2009). Cerebellum activity is mostly brought out by contrasts with a linguistic control task (naming, oral reading) – especially for the anterior lobe cluster – but, interestingly, sometimes also when

writing is “imagined” and when the control task involves a manual motor task (e.g. tracing circles in Beeson et al., 2003). A difference in complexity between handwriting and non-specific motor tasks could account for the latter result, which is illustrated by the presence of posterior cerebellum in the ALE results with only “motor controlled” contrasts (see Table VI-3 and Figure VI-4).

Despite these considerations suggesting considerable “non-specificity” of cerebellar function in handwriting (devoted to complex finger movement, whether in written spelling or other tasks), to our knowledge, the issue of the specific contribution of the cerebellum to written language production has never been directly addressed. The cerebellum is a complex, multifunctional structure with multiple direct and indirect connections with most parts of the brain. Its function has been typically linked with motor control, as cerebellar damage primarily affects coordination of voluntary movements (e.g. cerebellar ataxia) but recent literature has highlighted its importance in the processing of information in non-motor cognitive functions such as attention, memory, learning, time perception, emotion, and also language processing (e.g. Ohyama, Nores, Murphy, & Mauk, 2003). Abnormalities in grey matter volume in the right cerebellum declive have further been described as an important anatomical marker of dyslexia, a cognitive disorder particularly affecting spelling (Pernet, Poline, Demonet, & Rousselet, 2009).

The data presented here are, however, not sufficient to establish reliable, reproducible, clear dissociations between the two cerebellar territories according to the nature of the control task used, and thus the nature of the processes reflected (e.g. language processing, writing-specific motor planning and/or monitoring of execution). It therefore cannot be asserted that the cerebellum plays a role that is not solely motor-related in a writing situation – the notion of its major role in other functions, such as language, is now widely accepted (see Murdoch, 2010), especially since written spelling is a cultural skill acquired by long learning that is inseparable from its motor aspects. Furthermore, cerebellar activation related to language is heavily lateralized to the right, as motor activity of the right hand. A writing task performed with the left hand is therefore an easy way to separate the two. From this point of view, the bilateral cerebellum activation reported by Sugihara et al. (2006) in such conditions could reflect more than only motor activity.

III.2. “Extended” handwriting network

If writing is a learning-based skill, some of its “central” processes and neural underpinnings are probably shared with other abilities (e.g. reading, naming, speaking), and the same applies to its peripheral and motor components (processes shared with drawing for

instance). Recent data demonstrated the similarity of the electrophysiological activity related to early perceptual and lexical-semantic processes in oral and written naming (before 260 ms post-stimulus; Perret & Laganaro, 2012). As mentioned above, brain imaging experimental designs aiming to delineate writing-specific brain substrates require the use of reference tasks thought to control for some of these common processes. Several of the writing-related brain areas identified in the main ALE meta-analysis were not specific to writing (i.e. a network of brain areas restricted to written modality) but were rather engaged in less specific motor or linguistic functions that happen to intervene in writing tasks.

III.2.1. Motor-related handwriting areas

The primary motor and sensorimotor cortices (M1, SM1; BA4 and BA3; 3 peaks centred on $x = -36, y = -18, z = 56$; area 2 in Figure VI-3) are, of course, frequently activated, particularly in experiments in which the influence of motor output is not controlled. In general, control tasks designed to avoid such activation seem successful, as shown by the secondary meta-analysis results (see Figure VI-4). For example, Beeson et al. (2003) reported M1 activation when contrasting writing with a subvocal 'generative naming' control task but not with 'drawing circles' and Katanoda et al. (2001) obtained the same pattern with 'naming' versus 'finger tapping' control tasks. This confirms the relevance of motor control tasks when the focus of the experiment is on spelling *per se*, disregarding the peripheral and allographic components of handwriting. A drawback of this approach is that activation in a crucial area for handwriting likely to support central-to-peripheral information transfer, namely the superior frontal area mentioned earlier, may be cancelled out as it is embedded in a large cluster encompassing the central sensorimotor areas.

The supplementary motor area (SMA), an area located in the most medial part of BA6, is directly involved in the planning and execution of voluntary hand movements, while pre-SMA, located rostrally, appears to be involved in higher-level, more complex movements (Picard & Strick, 1996). It is therefore not surprising that activation in this region (on $x = -4, y = -10, z = 52$ and $x = -4, y = 4, z = 52$; area 4 in Figure VI-3), contralateral to the moving hand, is regularly reported during writing or drawing tasks. Our results show that it is primarily motor-related, since it is absent from the "motor-controlled contrasts" analysis results (see Figure VI-4). Using a ROI approach, Kato et al. (1999) showed that pre-SMA was activated during a Kanji retrieval task regardless of execution of hand movement, while SMA was mainly activated during the actual writing condition. This is consistent with previous results showing a significant role of the pre-SMA in visuomotor imagery with less complex finger movements (Deiber et al., 1998).

However, medial prefrontal activation during imagined writing is not necessarily observed (absent in Tokunaga et al. (1999); present in Harrington et al. (2007)). While SMA plays a significant role in written spelling, its involvement is not likely to be specific and would rather relate to higher-level sequence monitoring and response preparation. The functional distinction between pre-SMA and SMA seems to be relevant to handwriting, however, as our study revealed two distinct peaks in the ALE analysis. Further work will be required to better characterize their specific contributions to this specific language skill.

Subcortical peaks of activation are commonly reported and seem to converge in the ventral and posterior nuclei of the left thalamus ($x = -14, y = -22, z = 6$; area 6 in Figure VI-3). Although it is difficult to accurately show the existence of a common localized peak of activation in these studies, we can assume that, in most cases, this convergence zone reflects the involvement of a motor control pathway centred on the ventral thalamus, which receives cerebellar inputs and projects to the motor and premotor cortex (Middleton & Strick, 2000). Thalamic activation is more likely to be found in contrasts that do not control for motor output (it is not present in the “Motor output controlled” meta-analysis) and appears to be left lateralized when the writing hand is the right one and right-lateralized when writing with the left hand (Sugihara et al., 2006). In the same way, a convergence peak emerges in the putamen ($x = -26, y = -6, z = 0$; area 12), a striatum nucleus involved in the regulation of movements.

III.2.2. Left ventral premotor area and phono-graphemic conversion

The neural substrates of the phono-graphemic conversion mechanism engaged by writing down regular words under dictation were localized by Omura et al. (2004) in the left ventral premotor cortex (vPM, BA6) extending into the posterior part of the inferior frontal gyrus (IFG). They isolated this process using a finger-writing task for Japanese phonograms (Kana) contrasted to a symbol writing task for motoric processes, and to a repetition task for phonological retrieval. The reported peaks of activation are quite close to peaks reported in other studies and the corresponding area in our results is located in the left inferior precentral gyrus (preCG), around the posterior part of IFG ($x = -50, y = 6, z = 26$; area 7 in Figure VI-3).

This area did not reach the threshold in the ALE meta-analysis conducted with only contrasts which attempt to control for linguistic input (see Figure VI-4). This suggests that this region is not “writing-specific” but relates to the processing of inputs or linguistic processing shared with other tasks. This can be the case when contrasting handwriting with finger tapping or drawing but not with subvocal naming (Beeson et al., 2003; Katanoda et al., 2001). Such activations in the left ventrolateral frontal cortex may then be hard to distinguish, anatomically

and functionally, from Broca's area. The posterior IFG (Brodmann areas 44 and 45, including Broca's area) has been associated with a wide range of linguistic functions and its involvement in spelling is well-known since agraphic symptoms are usually described in non-fluent aphasia syndromes (Goodglass, 1993). The opercular IFG has been described as a component of the network underlying the "indirect" route in reading, i.e. the route involving grapho-phonologic conversion mechanisms (Jobard et al., 2003). The difficulty in teasing apart the respective roles of BA 44 and this ventral premotor area (preCG/IFG) has been highlighted by studies comparing reading and spelling tasks. The junction of the IFG and the preCS was identified as an overlapping site between reading and spelling (Rapp & Lipka, 2011), a result similar to those of Longcamp et al. (2003) (in both writing and passive viewing of letters). Such overlap may explain why we could not observe its activation when regrouping the "Linguistic/input controlled" tasks, even though the specific process of converting graphemes into phonemes was assumed not to be controlled therein.

Purcell et al. (2011a) further identified a portion of left BA44 which was specifically activated by their typed-spelling task (posterior superior part), while another portion was conjointly activated with reading. This type-spelling specific activation was then associated to the holding in short term memory of a phonological representation of the word prior to spelling (Purcell et al., 2011a) but it was also related with the orthographic lexicon given its sensitivity to word frequency (Rapp & Dufor, 2011), a result which contradicts the viewpoint of an involvement of this cluster solely in phoneme-to-grapheme conversion. In addition, the typical lesion site reported in phonological agraphia, in which the ability to spell out pronounceable pseudo-words is impaired while known words are written correctly, is located in the left perisylvian region or insula, rather than in the ventral premotor region (Alexander et al., 1992b; Roeltgen & Heilman, 1984; Roeltgen et al., 1983). By analogy with other language abilities, left BA44/preCG activations during handwriting might be regarded as a component of the phonologic-motor coordination network located alongside the preCG, as previously described for speech control involving articulatory planning as well as phonological components of speech (Price, 2010; Vigneau et al., 2006).

III.2.3. Left posterior inferior temporal cortex and lexical orthographic processing

An area in the left fusiform gyrus (BA37), near the inferior occipito-temporal junction, is the only temporal area appearing reliably activated when writing ($x = -46, y = -62, z = -12$; area 11 in Figure VI-3). Two studies actually focused on the role of the left posterior inferior temporal

cortex (PITC; BA37) in writing, described as an area specifically involved in Kanji processing (Nakamura et al., 2002; Nakamura et al., 2000). A focal lesion of this area can produce Kanji-selective agraphia (Soma, Sugishita, Kitamura, Maruyama, & Imanaga, 1989), which is interpreted as a disorder of mental recall of visual graphic images required for normal writing of Kanji. Nakamura et al. (2000) argue that this area is involved in the retrieval of visual graphic memory because it is activated in Kana-to-Kanji transcription tasks, with actual writing or with “mental recall” of orthography, but not in oral reading or semantic judgement tasks of Kana words. In the same way, Matsuo et al. (2001), using a ROI approach, reported greater activations in the fusiform gyrus (BA37) when ideographic (Kanji) characters rather than syllabic (Kana) characters were copied. However, Nakamura et al. (2002) demonstrated later that the left PITC could be activated during mental recall of Kana phonograms or Kanji ideograms, suggesting that the storage of the visual graphic image of both Japanese writing systems is supported by this same area.

With alphabetic European writing systems, its particular role has also been associated with storage or retrieval of visual graphic images of words or word orthography. Such an orthographic lexicon role is also supported by the performance of patients with a lesion in the PITC region, provoking lexical agraphia (Rapcsak & Beeson, 2004). Consistent with this data, Beeson et al. (2003) reported activations of the PITC region when the writing of words was compared to drawing circles or to writing letters. Posterior temporal or occipito-temporal foci of activation, although anatomically more dispersed, are also regularly reported in most of the neuroimaging works addressing written language. All these findings demonstrate that the left PITC is consistently involved in written spelling tasks, whatever the writing system used (alphabetic or pictographic), and may be related to retrieval of orthographic forms in long-term memory. These data nevertheless demonstrate that this area cannot be considered as a writing-specific area. Beeson et al. (2003) found it commonly activated in their writing and naming conditions, and Sugihara et al. (2006) explain that the lack of PITC involvement in the writing-specific network they describe may be due to the use of a naming condition as control. This region of the fusiform gyrus has, in fact, long been studied as a region of the ventral visual pathway specific to word recognition (Nobre, Allison, & McCarthy, 1994). The coordinates proposed by Cohen et al. for the Visual Word Form Area (VWFA; Cohen et al., 2000; Dehaene et al., 2002) an area consistently engaged in reading tasks, match the left PITC area discussed here perfectly. The VWFA is generally defined as a well-delineated area of the left fusiform gyrus which is found to be consistently activated when word stimuli are presented visually. Controversies about its function tend to suggest a function of integration of visual processing with high-level information, rather than the simple identification of sequences of letters (see Price, 2012).

The PITC is also found as one of the regions of shared activation between reading and spelling tasks (Purcell et al., 2011a; Rapp & Lipka, 2011). Its common involvement in reading and spelling would thus support the hypothesis of the shared function of orthographic lexicon, pertaining to abstract representations of words. The spatial localization of activation clusters can, however, differ between tasks (Purcell et al., 2011a). This suggests that different tasks involving orthographic processing could involve dissociable functional regions of the PITC, due to differences in input or output modality. We did, indeed, observe a large variability between the coordinates of peaks in this posterior temporal or occipito-temporal region during handwriting tasks (from -54 to -34 in x, from -72 to -50 in y and from -16 to -2 in z), which could arise from the diversity of tasks included and their specific demands: transposition of an auditory stimulus into graphomotor production, simple copy of ideographic characters, generative writing of narratives, written naming, imagined writing. From this point of view, the VWFA could represent a component devoted to visuo-orthographic processing within a larger, heterogeneous functional structure, while other components, remaining to be better characterized, could reflect computations between phonology and orthography, semantics and orthography or even orthography-to-allography processes. It remains that neuroimaging studies designed to identify writing-specific areas and using writing versus naming or oral repetition contrasts did not report PITC activations. fMRI experiment sensitivity may not be sufficient to identify writing-specific portions of this structure in whole-brain analyses.

III.3. Further questions

III.3.1. Right hemisphere cortical areas

Frontal peaks in the right hemisphere are occasionally reported through these studies, from the inferior frontal region to the superior prefrontal one. One region in particular attracted our attention, since it was the most consistently reported and emerged from the main ALE analysis (centred on $x = 26$, $y = 0$, $z = 54$; area 9 in Figure VI-3). This region is located in the posterior end of the right middle frontal gyrus, close to the precentral sulcus. Peaks were reported in various tasks, all of which implied right-hand writing in right-handers. Interestingly, a similar area, although the reported peak was located deeper in the cortex, was outlined by Roux et al. (2009) as the right homologue of the left writing-specific prefrontal area (i.e. the GMFA is defined as a bilateral area), and was activated in right-handers as in left-handers. These peaks, reported sporadically, do seem to converge in an area of the right hemisphere remarkably symmetrical to the left superior prefrontal area previously described (L-SFS/MFG). In addition, while Sugihara et al. (2006) report the same left frontal superior peak when writing with the

right or left hand, they also found a symmetrical, right hemisphere peak in left-hand writing only. As noted by Roux et al. (2009), such activation could reflect either a synchronized activity of this bilateral area or some inhibitory neural activities resulting from transcallosal inhibition mechanisms (since fMRI blood oxygen level dependent signal changes cannot distinguish between excitatory and inhibitory neural activities). The fact that this right hemispheric area emerges in this way from handwriting tasks mostly performed with the right hand (i.e. thought to involve the left hemisphere regarding its language functions as well as its motoric ones) is a result that needs to be further explored, to provide a better understanding of the nature of the computations performed by its left counterpart.

Activations in the right intraparietal lobule (R-IPL; $x = 40, y = -32, z = 46$; area 10) have also been reported during handwriting, although quite inconsistently. The peaks involved come from various contrasts; writing versus rest, naming, or drawing circles, but this area is never mentioned by authors as likely to play a critical role in writing. A remnant of a network of visuo-attentional guidance in handwriting may be suggested (see further).

III.3.2. Left supramarginal gyrus and angular gyrus

The anterior part of the supramarginal gyrus (SMG, BA40) is the third area described by Sugihara et al. (2006) as crucial for the writing process, although activated inconsistently across subjects in their study. The SMG has been proposed as supporting the grapheme-to-phoneme conversion mechanism (Roeltgen & Heilman, 1984; Sugihara et al., 2006), working in conjunction with the opercular part of Broca's area (Jobard et al., 2003; Vigneau et al., 2006). It is associated with both phonological agraphia, a writing disturbance characterized by an inability to write pseudowords (Alexander et al., 1992b) and phonological dyslexia, i.e. the associated deficit in reading (Beauvois & Derouesne, 1979). Specific pseudoword reading disturbances have recently been observed with direct cortical stimulation of the SMG (Roux et al., 2012). Moreover, the phonological processes supported by the left perisylvian region are believed to be modality-independent and shared between reading and spelling abilities (Rapcsak et al., 2009). However, this area failed to reach significance in the meta-analyses conducted here, although its activation was reported in 6 studies. Reported SMG activations are generally located in its upper or posterior part and included within a broader inferior parietal cluster (e.g. in Katanoda et al., 2001). Matsuo et al. (2001) further failed to establish significant differences in SMG involvement between Kana (thought to rely more on a phoneme-to-grapheme conversion process) and Kanji (rather involving a whole-word-form retrieval) handwriting tasks. Without questioning the "phonological" implication of the SMG in spelling,

one can assume that some anatomical variability of this inferior parietal region (Caspers et al., 2006) makes it more difficult to observe in neuroimaging than its frontal inferior counterpart.

Dual-route models of spelling (e.g. Rapp et al., 2002) propose that the spelling of a word can also be retrieved in a direct way from an orthographic lexicon. A common lesion site for lexical agraphia (i.e. inability to spell irregular words, reflecting impairment of this pathway) is the angular gyrus (AG, BA 39) (Roeltgen, 2003; Roeltgen & Heilman, 1984), an area long associated with spelling in reading – although other regions such as the posterior inferior temporal region (Rapcsak & Beeson, 2004; Soma et al., 1989) or precentral gyrus (Rapcsak et al., 1988) have been identified. Less specific writing disturbances can also be observed during cortical electric stimulation of the AG (Roux et al., 2003). However, neuroimaging works increasingly report the absence of any significant activation of the angular gyrus in handwriting, as opposed to the PITC region previously described. None of the peaks in the ALE analysis results were located in the AG. According to Brownsett et Wise (2010), who found modulation of AG activity during narrative production as opposed to production of simpler units, regardless of the modality (written or spoken), the function of AG may be linked with concept retrieval or working memory. Such high-level processes were probably not solicited enough to require AG activation during the simple linguistic tasks used in the studies reviewed here.

III.3.3. Visual attention and oculomotor control

Despite the diversity in experimental approaches, some secondary processes in writing were not always easily monitorable. Eye movements, for example, were rarely controlled in these studies and they were therefore a potential source of error in the interpretation of imaging data. The frontal eye field, the area responsible for generating saccades, is located very close to the frontal superior writing centre (GMFA). Furthermore, the FEF is also known to be involved in goal-directed control of visual attention (see Corbetta & Shulman, 2002). Comparison of FEF stereotactic coordinates reported in the literature (Paus, 1996) with those of the superior frontal writing centre previously described confirm this view. The FEF appears to be located in the precentral sulcus or in the depth of the posterior part of the superior frontal sulcus ($x=-32$; $y=3$; $z=47$) while the frontal superior writing centre we present here was located more dorsally ($x=-22$; $y=-8$; $z=54$), at a Euclidean distance of about 16 mm. Some aspects of this issue had already been raised by Matsuo et al. (2003) by comparing activations from a saccade task and three linguistic tasks involving phono-graphemic processes (e.g. Kana-to-Kanji transcription). They observed that the ventral premotor area they identified as Exner's area (in contradiction with our view of a SFS/Exner's area) was located approximately 15 mm anterior and inferior to

the left FEF. However, similar work remains to be done for the segregation between FEF and the left SFS area that we assume to be centrally concerned with writing. Although the use of MRI has often prevented any visual feedback on current written production and although most of the tasks used did not require ocular saccades or shifts of spatial attention (i.e. subjects were instructed to fixate the centre of the screen), optimal experimental designs should try to prevent this potential bias.

In the same way, the region of the intraparietal sulcus and superior parietal lobule (bilateral, although more often of the right hemisphere) is, interestingly, also a major node of the goal-directed attention network (Corbetta & Shulman, 2002; Nobre et al., 1997; Yantis et al., 2002). To our knowledge, no work has yet attempted to investigate the relationship between spatial attention and handwriting in this left parietal area (that we also found as partially bilateral). One can only speculate that the left counterpart of this right hemisphere IPS/SPL “attentional” area has gradually specialized, during the learning of handwriting, in the visuospatial control of graphemic production or the storage of letter forms, to become a region essential to handwriting.

IV. CONCLUSION

Different paradigms have been used to study the neural correlates of handwriting thanks to neuroimaging. Their results vary and do not always agree. The results of this meta-analysis addressing the points of agreement across all of them are quite consistent with those of a recent work focusing only on spelling processes (Purcell et al., 2011b), but sometimes differ with knowledge derived from lesion studies. An essentially left-hemisphere network is recruited for various handwriting tasks, with different languages and different writing systems. Two frontal and parietal superior areas appear crucially involved, while fronto-medial, precentral, frontal inferior, temporal posterior, thalamic and cerebellar regions contribute at different levels, from orthographic selection to motor execution. The design of experimental and control tasks is obviously critical if the role of each component of this cerebral network is to be clarified and future research should develop paradigms consistent with the specific cognitive processes targeted.

CHAPITRE VII : EXPERIMENTATION IRMf 1 : EFFETS DE LONGUEUR DE MOTS EN PRODUCTION ECRITE SOUS DICTEE

I. INTRODUCTION

Bien que les travaux de neuroimagerie s'étant intéressés à la production écrite du langage restent encore peu nombreux, leur mise en relation via une méthode statistique nous a permis d'identifier un vaste réseau d'aires cérébrales. Une des limites inhérente à cette approche quantitative, consistant à identifier le *commun* parmi les données fournies, est de lisser certaines spécificités, qui relèveraient tant de différences méthodologiques (e.g. écriture au doigt ou au stylo, de lettres ou de phrases) qu'issues des objectifs différents poursuivis dans chaque étude (e.g. identifier les aires spécifiques de la production écrite ou celles de la transcription de Kanas en Kanjis, etc.). Nous avons par exemple vu qu'une aire identifiée comme un « centre de l'écriture » par Sugihara et al. (2006) (gyrus supramarginal gauche), restait absente de nos résultats de méta-analyse. A l'inverse, chacune des aires du réseau décrit n'était bien évidemment pas systématiquement rapportée active dans tous ces travaux. En effet, les objectifs des divers expérimentateurs diffèrent, et du choix des tâches expérimentales et des tâches contrôles découlant de ces objectifs dépendront les résultats.

Notre objectif étant ici d'étudier la production écrite, manuscrite, du langage, telle que pratiquée lors de l'apprentissage et dans la vie de tous les jours (i.e. écriture cursive, avec un stylo sur une surface plane), nous avons d'abord souhaité confirmer que les différentes composantes du réseau cérébral décrit précédemment étaient bien impliquées dans une tâche de ce type. En outre, à la manière de travaux réalisés auparavant (e.g. Roux et al., 2009; Sugihara et al., 2006) nous avons cherché à identifier les aires spécifiques de la production écrite ; impliquées dans les processus de transformation de la représentation orthographique abstraite en commandes motrices manuelles, et différenciées des aires relevant de processus plus centraux (e.g. identification du stimulus, systèmes phonologiques et sémantiques) ou plus périphériques (e.g. programmation et exécution des mouvements de la main).

Nous avons donc conduit une étude en IRM fonctionnelle chez 16 sujets sains. Une tâche simple d'écriture sous dictée de mots isolés (en écriture cursive, réalisée avec un stylo sur une tablette graphique) a été choisie en tant que tâche expérimentale principale. Afin d'isoler les

aspects moteurs non-spécifiques de cette tâche d'écriture, une tâche contrôle de traçage de créneaux avec le stylo a été utilisée. En effet, par comparaison à des tâches contrôles motrices utilisées plus classiquement (du *finger tapping* au traçage de cercles), cette tâche nous a semblé la plus à même de contrôler la complexité motrice de l'écriture (qui comprend des changements de direction fréquents) ainsi qu'une certaine gestion visuo-attentionnelle de l'espace graphique (i.e. production graphique horizontale de gauche à droite, avec hauteur limitée). Pour contrôler les processus centraux liés notamment à l'identification du mot entendu, une tâche contrôle de répétition orale a été utilisée. Cette tâche, tout comme la tâche d'écriture, implique l'identification acoustique du stimulus et l'accès à sa représentation phonologique, voire lexicosémantique. Le mot est ensuite répété oralement via l'intervention de processus d'articulation motrice (ceux-ci ont par ailleurs été contrôlés par l'inclusion d'une quatrième tâche dans le protocole). La Figure VII-1 ci-après résume l'ensemble des processus cognitifs impliqués dans les tâches d'écriture sous dictée et de répétition orale utilisées, ainsi que ceux spécifiques de chacune de ces deux tâches.

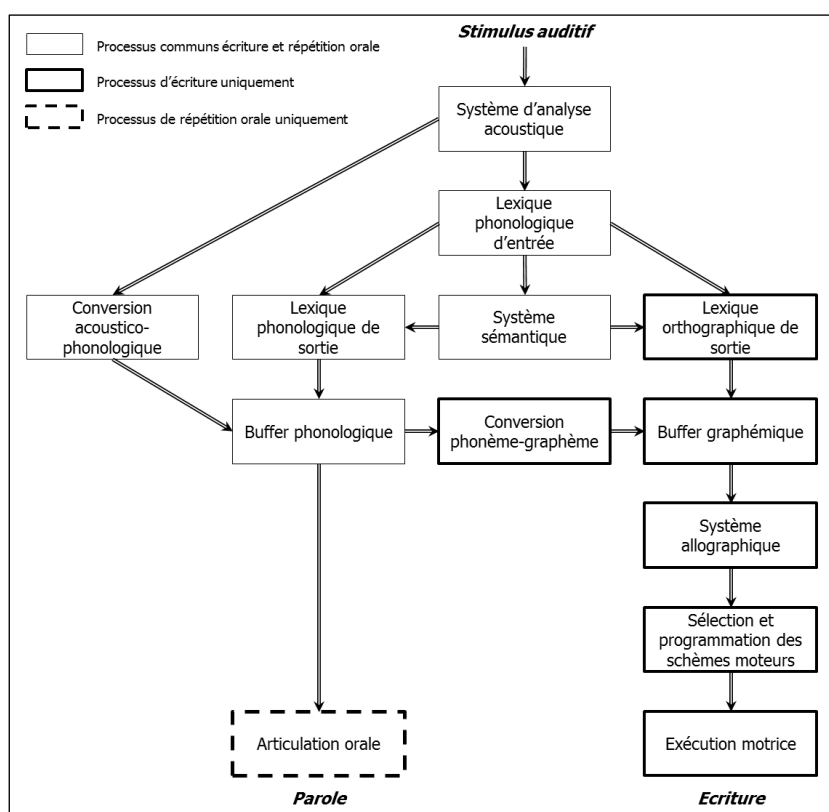


Figure VII-1 : Schéma des processus cognitifs impliqués dans les tâches de production écrite et de répétition orale utilisées dans l'expérimentation IRMf 1 (adapté de Caramazza et al., 1987; et Ellis, 1988).

Les résultats de la méta-analyse suggéraient que seules trois aires semblent activées dans l'écriture quelle que soit le type de tâche contrôle utilisée ; la « GMFA » (SFS gauche), le cortex pariétal supérieur gauche (IPS) et une région du cervelet droit (postérieur). Une de celle-

ci en particulier, la GMFA, fait l'objet de plusieurs interrogations, du fait notamment de sa « proximité » avec la traditionnelle aire d'Exner ; sa contribution dans l'écriture est-elle uniquement périphérique, dans la génération des programmes moteurs, ou a-t-elle un rôle plus en amont, dans la conversion phonème-graphème, le lexique orthographique, ou le stockage temporaire de la représentation orthographique (i.e. buffer graphémique) ? Cette dernière hypothèse peut être testée via la manipulation de la longueur des mots produits. En effet le rôle du buffer graphémique – on pourra aussi parler de mémoire de travail orthographique – étant de maintenir la représentation graphémique d'un mot pendant l'exécution des processus de sortie appropriés (Ellis, 1982; Hillis & Caramazza, 1989), il sera davantage sollicité par des mots contenant plus de graphèmes (et ce, indépendamment de la fréquence lexicale ou de la régularité orthographique de ceux-ci). Des mots de différente longueur ont donc été utilisés dans notre étude, afin d'identifier dans le réseau cérébral de l'écriture les aires sensibles à la longueur orthographique des mots, et en particulier de mettre au jour le rôle de la GMFA. La longueur de mot étant ici considérée comme une modulation de la charge dans le buffer graphémique, elle est conçue comme indépendante des gestes moteurs réellement effectués ; la « quantité » d'activité motrice devra être semblable malgré l'utilisation de mots de différente longueur.

Cette première expérimentation en IRMf comportait donc plusieurs objectifs :

- Mettre en évidence le réseau de l'écriture manuscrite dans une tâche de dictée de mots (12 aires identifiées lors de la méta-analyse, incluant la GMFA et le cortex pariétal supérieur).
- Valider la distinction entre les aires linguistiques/centrales (e.g. cortex prémoteur ventral et cortex temporal postérieur/inférieur), les aires motrices/périphériques (e.g. cortex moteur primaire, aire motrice supplémentaire) et les aires spécifiques de l'écriture (GMFA et cortex pariétal supérieur) de ce réseau.
- Identifier les aires sensibles à la longueur orthographique des mots produits (et tester l'hypothèse d'une telle sensibilité de la GMFA).

II. MATERIEL ET METHODE

II.1. Participants

16 participants adultes volontaires (8 femmes, 8 hommes), droitiers et de langue maternelle française, ont été recrutés (moyenne d'âge : $23,2 \pm 3,8$). Tous étaient en bonne santé physique, exempts de lésions cérébrales, de troubles neurologiques ou psychiatriques, de déficits visuels ou auditifs majeurs, ou de troubles de la lecture ou de l'écriture (e.g. dyslexie). Le

niveau cognitif général était vérifié via le MMSE (Folstein, Folstein, & McHugh, 1975 – normes françaises du GRECO ; Kalafat, Hugonot-Diener, & Poitrenaud, 2003) (moyenne : $29,4 \pm 0,7$). Le niveau en lecture était évalué via le test de l'Alouette-R (Lefavrais, 1967) (indice de précision moyen : $99,4\% \pm 0,4$; indice de vitesse moyen : 506 ± 62). Le degré de latéralité manuelle était établi grâce à l'échelle d'Edinburgh (Oldfield, 1971) (moyenne : $+0,85 \pm 0,11$).

II.2. Critères d'exclusion et recrutement⁵

En dehors des critères définis précédemment, les critères d'exclusion relatifs à l'examen d'IRMf incluait la présence d'implants métalliques dans le corps, la prise de médicaments affectant le système nerveux central ou la claustrophobie. L'adéquation à l'ensemble des critères d'inclusion et d'exclusion était vérifiée au cours d'un examen clinique réalisé par un des médecins participant à l'étude.

Cette étude, ainsi que la seconde étude en IRMf et les études utilisant la technique de stimulation magnétique transcrânienne (rTMS) (cf. chapitres VIII et IX), ont été approuvées par le Comité de Protection des Personnes Sud-Ouest et Outre-Mer I et tous les participants ont eu à signer un formulaire de consentement éclairé dont un exemplaire leur était délivré, après avoir lu une notice d'information détaillant le déroulement de l'étude et les éventuels risques encourus.

Le recrutement des participants a été effectué par voie de communication au sein des universités de Toulouse ainsi que par Internet via le Relais d'information sur les sciences de la cognition (RISC, <http://expesciences.risc.cnrs.fr/>).

II.3. Paradigme expérimental

L'examen d'IRMf était composé de 3 étapes ou « runs », séparés par des pauses, composés chacun de différentes conditions : une étape d'écriture sous dictée, une étape de répétition orale et une étape de génération orale de verbes. Les détails et résultats de cette dernière tâche incluse au protocole (3^{ème} run), dont l'objectif était d'évaluer la latéralisation fonctionnelle du langage chez nos participants, ne seront pas présentés ici mais sont disponibles

⁵ Pour cette étude, une indemnisation de 100 euros était prévue pour chaque participant provenant du budget octroyé à l'INSERM UMRS 825 (budget qui a également couvert le financement des passations d'IRM).

en annexe (Annexe 5). La présentation des stimuli de manière synchronisée avec l'acquisition des images fonctionnelles était réalisée via le logiciel Presentation® (NeuroBehavioral Systems) installé sur ordinateur portable HP EliteBook 8440p (Windows 7).

Le « run » **d'écriture sous dictée** était composé de trois conditions actives et d'une condition de repos, présentées selon un design en « blocs » (voir Figure VII-2). Dans la condition « Dictée de Mots Courts », les sujets devaient écrire le mot entendu de manière continue sur la tablette (i.e. l'écrire plusieurs fois jusqu'à la présentation du mot suivant), la condition « Dictée de Mots Longs » était identique avec des stimuli différents (voir la section Stimuli ci-après). A aucun moment les participants n'avaient de retour visuel sur leur production et ils ne voyaient pas non plus leur main. Dans la condition « Traçage de Créneaux », les participants avaient pour instruction de tracer des créneaux sur la tablette de manière continue, en réponse à la présentation d'un bruit blanc sonore (durée : 800 ms). Cette dernière condition « contrôle » visait à isoler les processus moteurs manuels indépendamment de l'activité linguistique.

Dans chacune de ces trois conditions, chaque bloc était composé de 6 essais (stimulus auditif + réponse) de 6000 ms (i.e. 2 TR, ou durée d'acquisition de deux volumes), soit 36 secondes par bloc. Chaque bloc était répété 6 fois au cours d'un run (avec des stimuli différents pour les deux conditions de Dictée). Un bloc de la condition « Repos » de 24 secondes survenait tous les trois blocs (i.e. alternance des trois conditions). La condition de « Repos » était simplement composée d'une croix de fixation présentée visuellement au centre de l'écran, sans aucun stimulus auditif. Cette croix de fixation était par ailleurs présente pendant toutes les autres conditions et les sujets avaient pour consigne de la fixer et d'éviter tout mouvement oculaire. L'ordre des blocs au sein d'un run était défini de manière pseudo-aléatoire hormis pour les blocs de repos intervenant de manière régulière. L'ordre des stimuli au sein des blocs était défini de manière aléatoire.

Les paramètres d'acquisition IRM utilisés (voir ci-après) permettaient d'exploiter des silences réguliers dans l'acquisition pour présenter les stimuli auditifs. Ces paramètres ont été fixés pour l'ensemble du protocole de sorte à bénéficier d'environ 1 seconde de silence toutes les 3 secondes (cf. Figure VII-2).

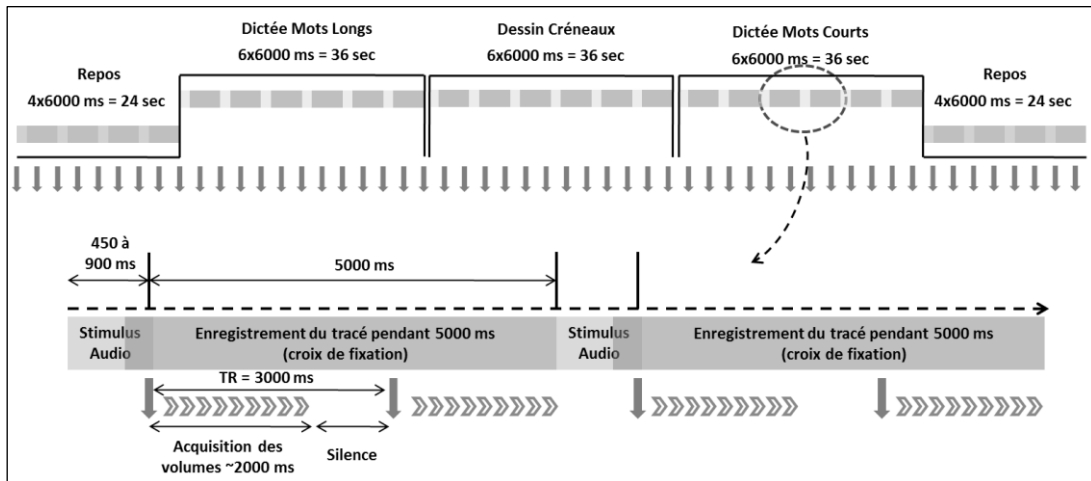


Figure VII-2 : Déroulement temporel d'un run d'écriture sous dictée (extrait représentant 5 blocs consécutifs ; en haut) et détail du déroulement temporel de deux essais (en bas). Chaque flèche verticale représente le début de l'acquisition d'un volume.

Le run de **répétition orale** était composé de manière identique (mis à part l'ordre des blocs et des stimuli), et impliquait les mêmes stimuli. Dans les conditions de « Répétition Mots Longs » et « Répétition Mots Courts », le participant devait simplement répéter oralement à voix haute le mot entendu, plusieurs fois et de manière continue jusqu'au stimulus suivant. Dans la condition « Répétition Syllabe », les participants avaient pour instruction de répéter oralement la syllabe sans signification « *flab* » en réponse à un bruit blanc auditif. Cette condition « contrôle » visait à isoler les processus moteurs articulatoires indépendamment de l'activité linguistique. La Figure VII-3 ci-après récapitule le déroulement des différents blocs dans les runs d'écriture sous dictée et de répétition orale.

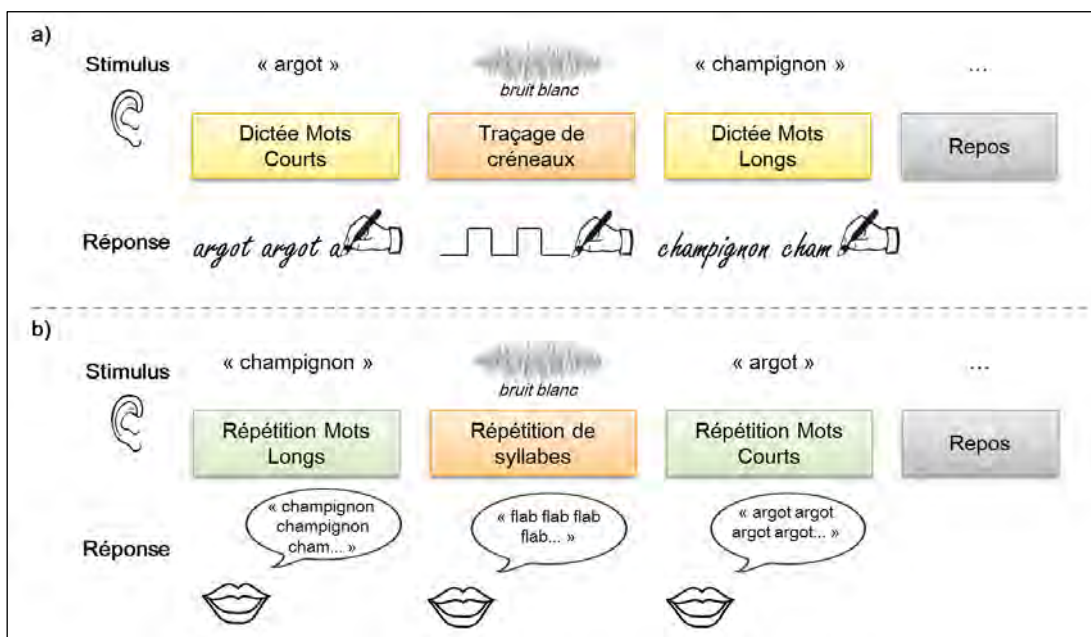


Figure VII-3 : Schéma récapitulatif des tâches et conditions utilisées dans le run d'écriture sous dictée (a) et le run de répétition orale (b).

Avant l'examen d'IRMf, chaque participant prenait part à une séance d'entraînement aux tâches lui permettant de se familiariser avec celles-ci et avec le dispositif (en particulier pour l'écriture sur la tablette en position allongée). Plusieurs ordres de passation des runs et des blocs au sein de ces runs étaient construits et contrebalancés entre les participants.

II.4. Stimuli

Les tâches d'écriture sous dictée et de répétition orale impliquaient la même liste de stimuli (afin de mieux contrôler les effets liés au traitement du stimulus auditif) composée de 36 mots courts (2 syllabes ; moyenne : 5,4 lettres) et 36 mots longs (3 syllabes ; 9,6 lettres), appariés en fréquence lexicale, fréquence de bigrammes et fréquence de trigrammes (cf. Table VII-1 et Annexe 4.1). Ces mots étaient tous des noms communs, monomorphémiques et non homophones. 12 items supplémentaires avec des caractéristiques semblables étaient par ailleurs utilisés lors de la phase de familiarisation avec le dispositif hors IRM.

Table VII-1 : Propriétés des items utilisés dans les tâches d'écriture sous dictée et de répétition orale en IRMf en fonction de leur longueur (n = 72). Les valeurs en gras indiquent une différence significative à un test T de Student. *** : $p < .0001$.

	Courts	Longs
Nombre de lettres	5,4***	9,6***
Nombre de phonèmes	4,6***	7,4***
Nombre de syllabes	2***	3***
Fréquence Films (lemmes)	20,9	18,5
Fréquence Livres (lemmes)	29,9	26,9
Fréquence Films	15,1	14,8
Fréquence Livres	19,3	19,2
Fréquence de trigrammes (token)	952	806
Fréquence de trigrammes (type)	2781	2222
Fréquence de bigrammes (token)	7194	7126
Fréquence de bigrammes (type)	21743	20166
Voisins phonologiques	4,5***	0,4***
Point d'unicité phonologique	4,5***	6,6***
Durée Acoustique (ms)	559***	742***

Les stimuli étaient prononcés par une locutrice avec un accent et une intonation neutres et enregistrés à 44.1 kHz/24 bit avec le matériel d'enregistrement décrit précédemment (cf. Chapitre V.I.2).

II.5. Acquisition IRMf et analyse des données

II.5.1. Paramètres de l'acquisition

L'expérience était réalisée en une session d'une heure sur une IRM Philips ACHIEVA (3 Teslas) dotée d'une antenne tête SENSE (8 canaux) dédiée à la recherche en neurosciences et située au Neurocampus Baudot de l'hôpital Purpan (Institut des Sciences du Cerveau de Toulouse). La présentation de stimuli visuels étaient assurée via un vidéoprojecteur Toshiba associé à un écran translucide. Les participants étaient munis d'un casque audio MR CONFON et de bouchons d'oreille, permettant de délivrer les stimuli auditifs tout en protégeant du bruit de l'acquisition IRM. Une tablette graphique amagnétique (Mag Design and Engineering, voir Figure VII-4) était disposée de manière inclinée au-dessus de la taille des participants, leur permettant d'écrire avec le stylo fourni. Ce dispositif permet de recueillir les paramètres temporels de la production (e.g. durée d'écriture, temps de réaction) en vue d'une analyse ultérieure.



Figure VII-4 : Tablette graphique amagnétique utilisée dans l'appareil d'IRM pour recueillir le tracé d'écriture.

Une image anatomique 3D haute résolution était initialement réalisée chez chaque sujet, constituée de 170 images pondérées en T1 recouvrant entièrement le volume cérébral (TR = 8,1ms ; TE = 3,7 ms ; angle de bascule = 8° ; champ de vue (FOV) = 240 x 240 mm ; taille de voxel = 1 mm³). Les images fonctionnelles ont été acquises selon une séquence EPI (Echo Planar Imaging) (TR = 3000 ms ; TE = 35 ms ; angle de bascule = 90° ; champ de vue (FOV) = 230 x 230 mm). Chaque volume était composé de 31 coupes axiales de 4 mm d'épaisseur recouvrant l'ensemble du cerveau (dimensions de la coupe : 96 x 94 pixels ; taille de voxel : 2,40 x 2,44 x 4 mm). Les paramètres ainsi définis permettaient une durée d'acquisition réelle de 1984 ms par volume, soit un « silence » de 1016 ms entre chaque acquisition, mis à profit pour présenter les stimuli auditifs.

II.5.2. Prétraitement des images

Toutes les images d'IRMf acquises ont été traitées au moyen du logiciel SPM12b (Statistical Parametric Mapping, Wellcome Department of Imaging Neuroscience, London, UK, 2012, <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>) implémenté sous la suite MATLAB (R2011b, The MathWorks, Inc., Natick, MA, United States).

Pour chaque sujet nous disposons de 2 groupes de 264 images fonctionnelles correspondant aux volumes acquis lors des runs d'écriture sous dictée et de répétition orale (les données du run de génération de verbes étant traitées dans un second temps, cf. Annexe 5). Ces images, ainsi que l'image anatomique T1 du sujet, étaient converties du format natif DICOM vers le format NIfTI au moyen du logiciel « dcm2nii » (Chris Rorden, 2011).

Différents prétraitements étaient effectués sur les images en utilisant différents modules de SPM afin d'aboutir à des images réalignées et normalisées dans l'espace standard MNI en vue des analyses statistiques ultérieures. Ces prétraitements incluaient consécutivement un *Slice Timing* (i.e. correction traitant les différences du moment d'acquisition des différentes coupes du volume, la première coupe de chaque volume étant acquise environ 2 secondes avant la dernière), un réalignement des volumes entre eux (i.e. transformations affines rigides dans 3 dimensions de translation et 3 dimensions de rotation, corrigeant ainsi notamment le mouvement de la tête du sujet lors de l'acquisition), puis une normalisation vers l'espace standard MNI, et enfin un lissage spatial (ou « *smoothing* ») via un noyau gaussien de 8 mm³ de FWHM (dans le but de réduire le bruit). La normalisation était permise via des paramètres (ou « champ de déformation ») calculés lors d'une étape de segmentation de l'image T1 du sujet préalablement coregistrée (ou réalignée) sur l'image moyenne des images fonctionnelles. Cette étape, qui procède par l'identification et la segmentation des différents tissus dans l'image (i.e. substance blanche, substance grise et liquide céphalo-rachidien) et leur mise en relation avec ceux d'une image *template* ou modèle, permet aussi d'obtenir le champ de déformation inverse, utile à la « dé-normalisation » d'une région d'intérêt (cf. Chapitre IX).

II.5.3. Analyse des données de neuroimagerie

Les images individuelles, réalignées, normalisées et lissées, étaient analysées statistiquement sous SPM selon un modèle linéaire généralisé (General Linear Model ou GLM) (Friston et al., 1994). Le GLM utilisé au premier niveau pour chaque volontaire incluait les 6 conditions : « Écriture – mots courts », « Écriture – mots longs », « Traçage de créneaux », « Répétition – mots courts », « Répétition – mots longs » et « Répétition de syllabes ». Pour

prendre en compte la spécificité temporelle du signal BOLD (atteignant son pic environ 5 sec après le stimulus et mettant environ 30 sec pour rejoindre sa ligne de base), les termes du modèle étaient convolués avec la fonction de réponse hémodynamique canonique ou HRF (i.e. Hemodynamic Response Function).

Etant donnée la durée importante des blocs et le délai important entre deux blocs identiques, les données ont été filtrées via un filtre passe-haut correspondant à 264 secondes (i.e. suppression des fréquences inférieures à $\sim 3,8$ mHz). La pertinence de ce filtrage a été vérifiée en examinant les graphiques du domaine fréquentiel obtenus sous SPM.

La matrice de l'analyse GLM incluait en tant que régresseurs (non pris en compte lors de la convolution) les six paramètres du mouvement de la tête du sujet au cours de l'acquisition, calculés lors de l'étape de réalignement (3 dimensions de translation et 3 dimensions de rotation). Cette étape a pour but de prendre en compte dans le modèle l'effet du mouvement afin de le distinguer de l'effet principal que l'on veut mesurer. De la même manière, dans l'analyse GLM, un autre régresseur correspondant à la moyenne du signal brut dans le liquide céphalo-rachidien au cours de l'acquisition (i.e. LCR ; ventricules cérébraux et espace sub-arachnoïdien) a été ajouté au modèle (mesure réalisée chez chaque sujet via MarsBar v0.43 en utilisant le masque de LCR calculé lors de l'étape de segmentation).

Les contrastes correspondant à l'activation de chaque condition par rapport à la ligne de base (images « bêta », correspondant aux coefficients de régression estimés du modèle) étaient produits pour chaque participant au premier niveau (les phases de repos des deux runs n'étaient pas modélisées comme des conditions indépendantes et intégraient donc la ligne de base). Ces cartes statistiques étaient ensuite intégrées dans une analyse de groupe à effets aléatoires au second niveau nous permettant de calculer les contrastes d'intérêt (cartes de T). Nous avons exploré les résultats avec un seuil d'activation très rigoureux ($p < .05$ avec correction FWE, *Family Wise Error*) puis nous avons exploré les résultats avec un seuil statistique plus permissif ($p < .001$ sans correction). Le seuil d'étendue de cluster était fixé à $k > 20$ voxels.

La toolbox xjView 8 pour SPM (Cui, Li, & Song, 2011) a été utilisée pour visualiser les activations et identifier les structures anatomiques impliquées. Les cartes statistiques de groupe étaient superposées sur un modèle 3D standardisé pour leur visualisation via le logiciel MRICron (Rorden & Brett, 2000).

III. RESULTATS

III.1. Données comportementales

Les tâches d'écritures en IRM étant réalisées sur une tablette graphique, il nous a été possible d'enregistrer les productions des sujets et donc de contrôler la bonne réalisation de la tâche. L'analyse de ces données comportementales a été conduite dans le but d'éclairer l'interprétation des résultats de neuroimagerie (e.g. vérifier que l'activité motrice produite était d'une durée comparable dans les différentes tâches ou conditions ou de tester si un effet comportemental de la longueur des mots était détectable). Cependant, en raison de limitations techniques liées au matériel (lorsque la pression exercée par le stylo était trop faible, lors du traçage de certaines boucles rapides chez certains participants, le tracé effectué pouvait ne pas être détecté pendant quelques millisecondes et ainsi contenir des vides à l'intérieur des mots) nous avons considéré que les mesures de distance parcourue par le stylo ou de vitesse n'étaient pas suffisamment fiables pour être utilisées et rapportées.

III.1.1. Comparaison « Ecriture dictée vs. traçage de créneaux »

Le premier objectif était de d'évaluer d'éventuelles différences dans les temps de réaction (ou latences ; mesurées à partir de l'apparition du stimulus) ou les durées d'écriture (il faut cependant noter que les sujets étant invités à écrire ou tracer tout au long de la durée de l'essai, la durée d'écriture dans chaque essai est très dépendante du moment où débute la production) selon le type de tâche : Ecriture vs. Traçage de créneaux. Le second objectif était de mettre en évidence un éventuel effet comportemental de la nature des mots produits : mots courts ou mots longs.

Des analyses utilisant un modèle linéaire mixte ont été conduites avec le type de Tâche en tant qu'effet fixe et le facteur Sujet en tant qu'effet aléatoire (afin de prendre en compte la variabilité inter-sujets). Les essais problématiques étaient exclus (le sujet n'a rien tracé sur la tablette, ou ne s'est pas arrêté entre deux essais). Les moyennes et écart-types des latences et des durées en fonction de la tâche sont rapportées dans la Table VII-2.

Table VII-2 : Valeurs moyennes (et écart-types) des latences et durées de production lors des conditions d'écriture sous dictée et de traçage de créneaux en IRMf.

	Ecriture sous dictée	Traçage de créneaux
Latences (ÉT) (ms)	1047 (251)	1145 (246)
Durées (ÉT) (ms)	4744 (376)	4705 (344)

Après suppression des valeurs extrêmes, une analyse a été conduite sur les latences. La différence entre les conditions « Ecriture » (1049 ms) et « Traçage de créneaux » (1148 ms) était significative ($F(1, 1670) = 70,4$; $p < .001$). Une seconde analyse, sur les durées d'écriture a là encore révélé une différence significative (4744 ms pour la condition « Ecriture » vs. 4703 pour la condition « Traçage de créneaux » ; $F(1, 1656) = 5,83$; $p < .02$).

III.1.2. Comparaison « Ecriture dictée de mots courts vs. Ecriture dictée de mots longs »

Pour évaluer l'effet de la longueur des mots (i.e. « Mots courts » vs. « Mots longs »), des analyses similaires ont été conduites avec la condition Longueur en tant qu'effet fixe et le facteur Sujet en tant qu'effet aléatoire. La covariable correspondant à la durée acoustique du stimulus a été intégrée dans le modèle. La différence de latence entre les conditions « Mots courts » (1051 ms) et « Mots longs » (1046 ms), après suppression de 1,2% de valeurs extrêmes, n'était pas significative ($F(1, 1122) = 0,07$; $p = .79$). Le même résultat était observé sur les durées d'écriture (moyenne ajustée de 4760 ms pour les mots courts vs. 4727 ms pour les mots longs ; $F(1, 1138) = 1,33$; $p = .25$).

Cependant, lorsque la durée acoustique n'était pas prise en compte, les différences de latence et de durée d'écriture entre les mots courts et longs apparaissaient significatives ($F(1, 1122) = 52,6$; $p < .001$ et $F(1, 1126) = 57,8$; $p < .001$), du simple fait d'un décalage temporel du déclenchement la réponse (voir Figure VII-5).

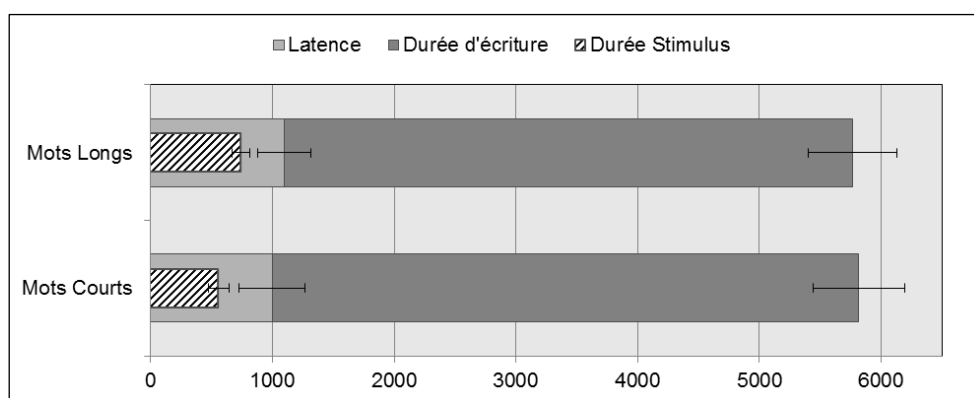


Figure VII-5 : Histogramme cumulé des latences et durées d'écriture moyennes (en ms) lors de la tâche d'écriture selon le type de mot. La durée acoustique moyenne des stimuli est aussi représentée. Les barres d'erreur représentent l'écart-type.

En conclusion, nous avons constaté que, bien que des différences significatives soient présentes, la durée de production dans chaque essai restait comparable entre les deux différentes tâches, d'écriture ou de traçage de créneaux. Les participants débutaient leur production aux alentours de 1100 ms après la présentation du stimulus et poursuivaient celle-ci pendant 4700 ms.

Bien que les latences étaient en moyenne plus courtes, et les durées de production mécaniquement rallongées pour l'écriture de mots courts par rapport à l'écriture de mots longs, les analyses incluant la durée acoustique n'a révélé qu'aucun « coût » cognitif de la longueur des mots.

III.2. Données de neuroimagerie

L'analyse de second niveau (i.e. analyse de groupe) nous a permis de réaliser différents contrastes visant, dans un premier temps (i.e. analyses principales), à identifier les structures cérébrales activées lors de la tâche d'écriture par rapport à la ligne de base (incluant le repos), puis par rapport aux deux tâches contrôles, orale et motrice. Dans un second temps (i.e. analyses additionnelles), des contrastes plus spécifiques ont été conduits dans le but d'identifier les aires cérébrales du traitement des mots, les aires spécifiques de l'écriture et enfin les aires sensibles à la longueur orthographique des mots écrits. Pour ce faire, nous avons utilisé les résultats de certains contrastes en tant que « masques », ce qui consiste à restreindre l'exploration des activations uniquement aux voxels qui étaient significativement activés lors de ce premier contraste (masque « inclusif ») ou au contraire uniquement à ceux qui n'y étaient pas significativement activés (masque « exclusif »). Lorsqu'elles ne sont pas présentées dans le corps du texte, les tables de résultats des différents contrastes sont disponibles Annexe 4.2.

III.2.1. Analyses principales

III.2.1.1. « Ecriture sous dictée vs. ligne de base »

Le contraste principal « Ecriture sous dictée vs. ligne de base » révélait des activations dans un vaste réseau impliquant notamment un important cluster fronto-pariétal gauche comprenant le cortex moteur et sensori-moteur primaire (au niveau du sillon central, BA 4/3), le cortex prémoteur supérieur, inférieur, et l'aire motrice supplémentaire (BA 6) ainsi que le cortex pariétal supérieur (BA 40, BA7). D'autres clusters étaient situés dans le cervelet droit (lobes antérieur et postérieur), le gyrus frontal inférieur droit (BA 44), le cortex pariétal inférieur droit

(BA 40), le thalamus gauche, le putamen gauche, le cortex pariétal inférieur/temporal supérieur gauche (incluant le gyrus supramarginal, BA 40) puis temporal supérieur/frontal inférieur gauche (cf. Figure VII-6).

Table VII-3 : Activations significatives pour l'analyse de groupe du contraste « Ecriture sous dictée > Ligne de base »

Localisation		Taille de cluster	Valeur T	Z-score	Coordonnées MNI		
					x	y	z
Gauche	Gyrus postcentral (BA 3/4)	2770	19,01	Inf	-39	-21	54
	Gyrus précentral		17,90	Inf	-30	-27	60
	Gyrus frontal moyen (BA 6)		17,36	Inf	-27	-9	60
	Lobule pariétal inférieur (BA 40)		13,32	Inf	-36	-42	57
	Aire motrice supplémentaire (BA 6)		11,20	Inf	-3	-6	51
	Gyrus supramarginal		10,95	Inf	-51	-21	42
	Lobule pariétal supérieur (BA 7)		10,10	Inf	-27	-57	60
	Gyrus frontal inférieur (BA 9)		9,51	Inf	-54	3	33
	Lobule pariétal inférieur (BA 40)		9,38	7,80	-42	-33	36
Droit	Gyrus frontal moyen (BA 6)		8,13	7,02	27	-9	57
Gauche	Cingulum		7,90	6,87	-9	-24	45
	Lobule pariétal supérieur (BA 7)		6,97	6,21	-18	-66	54
Droit	Cervelet antérieur (culmen)	896	17,83	Inf	18	-51	-24
	Cervelet antérieur (culmen)		16,80	Inf	9	-54	-18
	Cervelet postérieur (vermis)		13,47	Inf	6	-69	-39
Droit	Gyrus précentral/Frontal inférieur (pars opercularis)	79	7,49	6,59	60	9	12
	Gyrus frontal inférieur (pars opercularis)		7,37	6,50	60	9	24
Droit	Lobule pariétal inférieur	94	6,79	6,08	42	-42	51
	Gyrus supramarginal (BA 40)		5,10	4,77	45	-33	39
Gauche	Thalamus	24	6,60	5,95	-12	-21	3
	Putamen	87	6,19	5,64	-27	0	0
	Putamen		6,03	5,51	-21	9	0
Gauche	Gyrus temporal supérieur (BA 41)	60	6,17	5,54	-45	-27	15
	Gyrus supramarginal		5,88	5,39	-57	-21	15
Gauche	Gyrus temporal supérieur/Frontal inférieur	25	5,68	5,24	-51	12	-3

Les valeurs des pics présentés en gris clair sont extraites d'une analyse complémentaire restreinte au cluster principal (k = 2770 voxels).

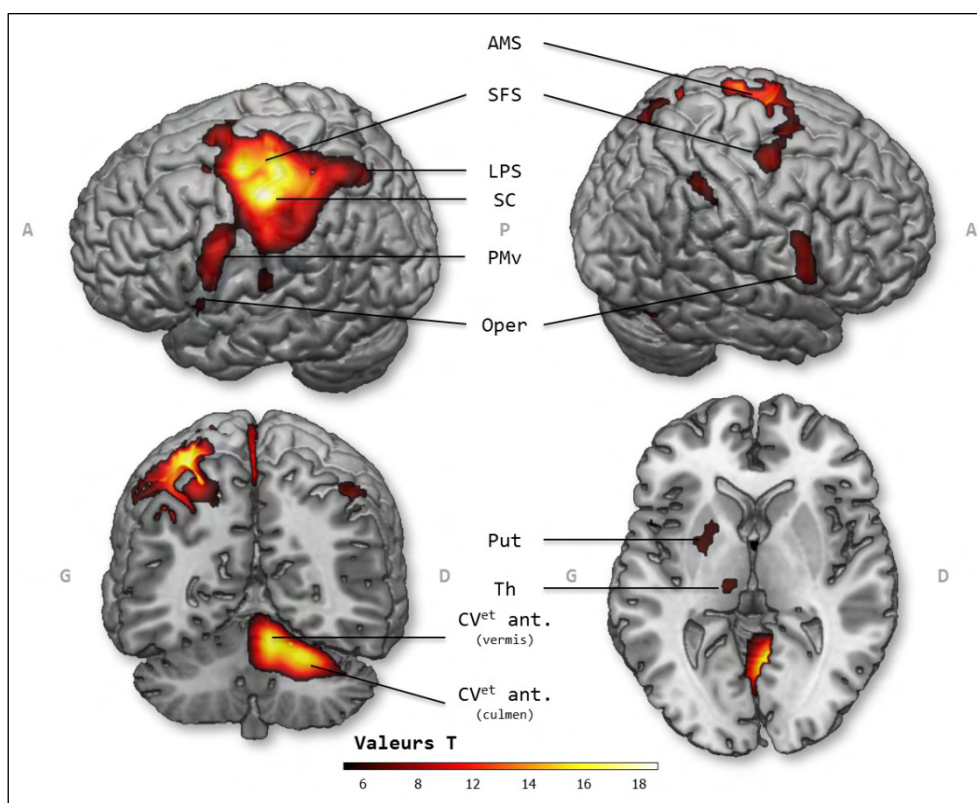


Figure VII-6 : Projection des résultats d'IRMf rapportant les activations dans la tâche d'écriture sous dictée par rapport à la ligne de base ($p < .05$, FWE corr.). AMS, aire motrice supplémentaire ; SFS, sillon frontal supérieur ; LPS, lobule pariétal supérieur ; SC, sillon central ; PMv, cortex prémoteur ventral ; Oper, pars opercularis ; Put, putamen ; Th, thalamus ; CV^{et} ant., cervelet antérieur.

III.2.1.2. « Ecriture sous dictée vs. Répétition orale »

Les tâches d'écriture sous dictée et de répétition orale de mots impliquent le traitement acoustique et phonologique (et lexico-sémantique) des mêmes stimuli auditifs. Elles diffèrent donc essentiellement sur les processus associés à la sortie motrice (production manuelle vs. articulation orale) mais aussi au niveau de la nature des représentations requises pour cette production (e.g. représentation orthographique ou graphémique pour la production écrite vs. représentation phonologique de sortie pour la production orale). 4 clusters émergeaient au seuil de $p < .05$ (correction FWE, $k > 20$) dans le contraste « Ecriture sous dictée vs. Répétition orale » : un vaste cluster fronto-pariétal supérieur gauche (gyrus frontal supérieur, gyrus précentral, gyrus postcentral, lobule pariétal inférieur, lobule pariétal supérieur, aire motrice supplémentaire) (incluant un pic dans la GMFA : $x = -27$; $y = -9$; $z = 63$), le cervelet droit (lobes antérieur et postérieur), le gyrus frontal supérieur droit ($x = 27$; $y = -9$; $z = 57$) et le lobule pariétal inférieur droit. Le seuil de significativité a été abaissé pour tenter de retirer davantage d'information de ce contraste ($p < .001$ sans correction, $k > 20$; Figure VII-7). Un cluster supplémentaire apparaissait ainsi à l'intersection du gyrus précentral et du gyrus frontal

inférieur gauche (ou cortex prémoteur ventral, $x = -54$; $y = 3$; $z = 33$), ainsi que des activations du gyrus orbital bilatéral.

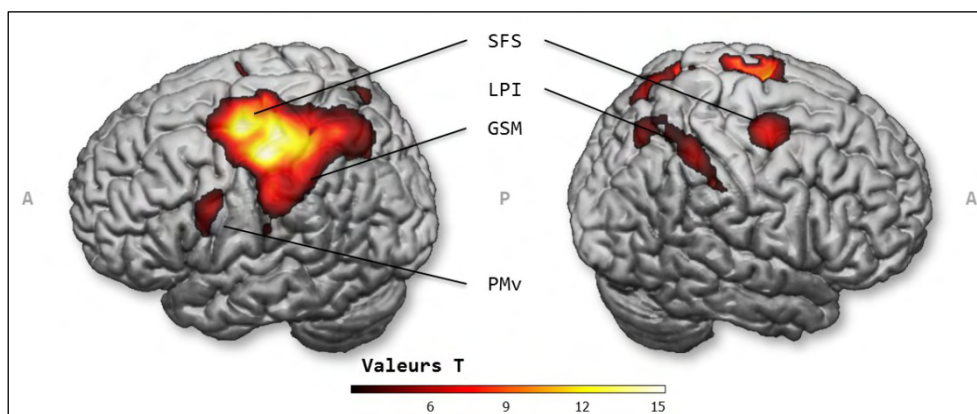


Figure VII-7 : Activations cérébrales pour le contraste « Ecriture sous dictée > Répétition orale » (seuil $p < .001$ unc, $k > 20$). Vues sagittales droite et gauche. SFS, sillon frontal supérieur ; LPI, lobule pariétal inférieur ; GSM, gyrus supramarginal ; PMv, cortex prémoteur ventral.

III.2.1.3. « Ecriture sous dictée vs. Traçage de créneaux »

Ce contraste était conçu pour mettre en évidence des activités cérébrales reflétant les demandes linguistiques de la tâche (traitement phonologique du stimulus, accès sémantique et orthographique), ainsi que les processus périphériques spécifiques de l'écriture (buffer graphémique, récupération des allographes) : en excluant les processus liés au geste graphomoteur (en tant que tracé graphique effectué avec un stylo). Ce contraste révélait pourtant au contraire des activations dans un réseau essentiellement moteur : incluant le cervelet droit, le cortex moteur et sensori-moteur primaire gauche et l'aire motrice supplémentaire (seuls ces trois clusters sont visibles au seuil de $p < .05$ avec correction FWE). Au seuil de $p < .001$ sans correction ($k > 20$) (Figure VII-8), on retrouvait des pics d'activations supplémentaires dans le cortex frontal inférieur gauche (gyrus précentral inférieur et pars opercularis) ou encore le cortex pariétal supérieur/inférieur gauche. Un pic dans la GMFA droite était aussi présent ($x = 30$; $y = -18$; $z = 57$) (l'activation de GMFA gauche est présente mais incluse dans le plus vaste cluster centré sur l'aire motrice primaire). Deux clusters étaient aussi visibles dans la face interne du lobe occipital (cuneus) et dans le gyrus fusiforme / gyrus temporal inférieur gauche (BA37 ; coordonnées MNI : $x = -48$; $y = -60$; $z = -18$). Ce dernier cluster correspondait à l'aire PITC (*posterior inferior temporal cortex*), dont nous avons postulé un rôle dans l'écriture en lien avec la récupération des formes orthographiques (cf. Chapitre VI).

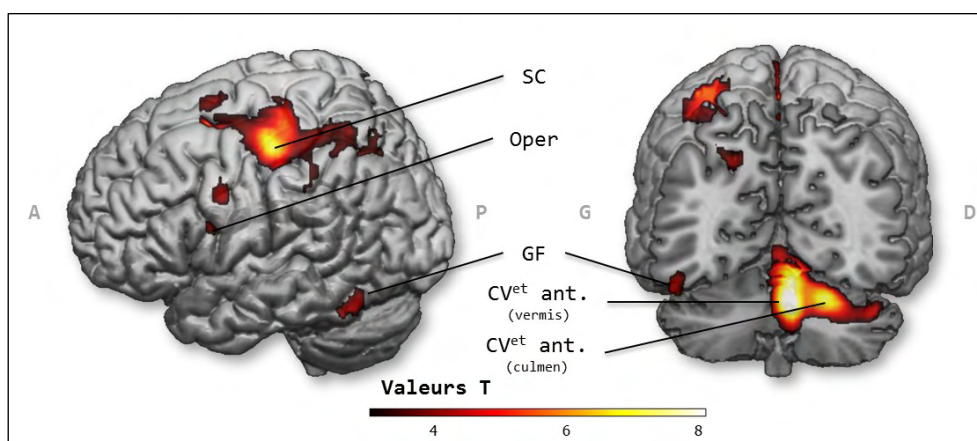


Figure VII-8 : Activations cérébrales pour le contraste « Ecriture sous dictée > Traçage de créneaux » (seuil $p < .001$ unc, $k > 20$). Vues sagittales gauche et coupe coronale en vue postérieure. SC, sillon central ; Oper, pars opercularis ; GF, gyrus fusiforme ; CV^{et} ant., cervelet antérieur.

III.2.2. Analyses additionnelles

III.2.2.1. Aires du traitement des mots : conjonction

Afin de déterminer si chacune des aires révélées par le précédent contraste relevaient davantage de processus périphériques ou plutôt de processus centraux en lien avec le traitement du stimulus (i.e. processus phonologiques et lexico-sémantiques, permettant l'identification du mot entendu en vue de sa production), le contraste « Répétition de mots vs. Répétition de syllabes » a été utilisé dans deux analyses secondaires. En effet, la tâche de répétition de la syllabe sans signification « *flab* » était conçue pour contrôler à la fois les processus moteurs articulatoires de la tâche de répétition orale et le traitement du stimulus (le mot était remplacé un simple bruit blanc). Ainsi une analyse de conjonction a été conduite (méthode « *conjunction null* » sous SPM) entre les contrastes « Ecriture sous dictée vs. Traçage de créneaux » et « Répétition de mots vs. Répétition de syllabes ». Ce test, conçu pour localiser les aires communément actives dans ces deux contrastes, n'a révélé que très peu de voxels significatifs. En effet, seul un seuil de $p < .005$ (sans correction, $k > 20$ voxels) a permis de faire émerger 3 clusters : gyrus temporal supérieur/moyen droit, pars opercularis du gyrus frontal inférieur gauche et aire motrice supplémentaire.

III.2.2.2. Aires spécifiques de la production écrite : analyse avec masque exclusif

Dans un second temps le contraste « Répétition de mots vs. Répétition de syllabes » (à $p < .001$, sans correction) a été utilisé en tant que masque exclusif sur le contraste « Ecriture sous dictée vs. Traçage de créneaux ». L'objectif était cette fois d'exclure de ce dernier les clusters relevant du traitement acoustique et linguistique des mots, pour ne conserver que les aires

spécifiques de la production écrite. Comme le laissaient présager les résultats précédents, la carte d'activation obtenue après l'utilisation du masque est très similaire à la carte initiale ; activations dans le cervelet droit, le sillon central (M1/SM1), le lobule pariétal supérieur gauche, l'aire motrice supplémentaire, le gyrus fusiforme gauche ou encore le cortex prémoteur ventral. Seul le cluster dans la pars opercularis gauche n'était plus présent.

III.2.2.3. Aires sensibles à la longueur des mots

Un des objectifs de ce travail était de chercher à mettre en évidence les aires du réseau cérébral de l'écriture impliquées dans la mémoire de travail orthographique (ou buffer graphémique) et donc sensibles à la longueur des mots écrits (indépendamment de l'activité motrice, les sujets étant invités à écrire de manière continue et répétée dans chaque essai, que le mot soit court ou long). Les contrastes « Ecriture de mots longs > Ecriture de mots courts » et « Ecriture de mots courts > Ecriture de mots longs » ont été produits. Le premier de ces deux contrastes n'a révélé aucun cluster actif au-delà du seuil de $p < .001$ (sans correction). Seuls deux clusters étaient identifiés au même seuil dans le second contraste, et reflétaient donc des aires significativement plus actives lors de l'écriture de mots courts que lors de l'écriture de mots longs : le lobule pariétal supérieur droit (BA 7 ; 30 voxels ; $x = 24$; $y = -60$; $z = 60$) et le gyrus lingual (BA 30/19 ; 22 voxels ; $x = 15$; $y = -48$; $z = 3$). Cependant, la même analyse conduite en utilisant le contraste « Ecriture sous dictée vs. Ligne de base » en tant que masque inclusif ($p < .001$) n'a plus révélé aucun cluster actif.

Synthèse des résultats

Réseau cérébral de l'écriture sous dictée

- Les principales composantes du réseau décrit dans la littérature et dans notre méta-analyse ont été retrouvées activées lors de notre tâche d'écriture de mots sous dictée (M1/SM1, AMS, CV^{et} droit, PMv gauche, LPS et LPI gauche).
- La tâche contrôle orale (linguistique) a montré que l'essentiel des aires de réseau étaient davantage activées lors de l'écriture que lors de la répétition orale (cortex fronto-pariétal supérieur gauche, PMv gauche, ainsi que SFS et LPI droit), mais n'a permis de révéler que très peu de voxels actifs à la fois lors de ces deux tâches (GTS droit, GFI gauche, AMS).
- La tâche contrôle graphomotrice n'a pas permis d'isoler clairement les processus non moteurs de l'écriture (persistance de l'activation de M1) mais a mis en évidence une activation du gyrus fusiforme (ainsi qu'une persistance de l'activation de la pars opercularis).

Effet de la longueur des mots

- Aucune aire du réseau cérébral de l'écriture n'est apparue comme sensible à la longueur des mots produits (indépendamment de l'activité motrice). Deux aires hors de ce réseau, dans l'hémisphère droit (LPS et gyrus lingual), apparaissent cependant plus activées lors de l'écriture de mots courts par rapport à l'écriture de mots longs.

Localisation de la GMFA

- Un pic avec une forte valeur de T au niveau du sillon frontal supérieur, correspondant à la GMFA précédemment décrite, a été identifié dans le contraste d'écriture principal (coordonnées MNI : x = -27 ; y = -9 ; z = 60). L'activation de cette aire, qui apparaît de plus clairement bilatérale, persiste quelle que soit la tâche contrôle utilisée.

IV. DISCUSSION

IV.1. Le réseau cérébral de l'écriture

Le premier objectif de ce travail était d'identifier le réseau cérébral de l'écriture manuscrite dans une tâche d'écriture sous dictée et ainsi reproduire les données publiées dans la littérature. Le travail de méta-analyse avait révélé l'implication d'un grand nombre d'aires (12 aires corticales et sous-corticales, dans les deux hémisphères) que nous retrouvons toutes activées dans notre étude en neuroimagerie (notamment dans le contraste « Ecriture vs. ligne de base »). Il s'agit notamment du cortex moteur et sensori-moteur primaire gauche, de l'aire motrice supplémentaire, du cortex prémoteur supérieur et inférieur (ou ventral) gauche, du cortex pariétal supérieur et inférieur gauche, du cervelet droit, ou encore des deux aires

corticales droites supérieures frontales et inférieure pariétale. Seule l'activation d'un petit cluster temporal supérieur/pariétal inférieur gauche (BA 41) semblait refléter la nature auditive de la tâche. Des activations sous-corticales, dans le thalamus et dans putamen gauche étaient présentes, et probablement attribuables au contrôle moteur en vertu de connexions anatomiques et fonctionnelles connues entre ces noyaux et le cortex moteur et prémoteur (impliquant aussi le cervelet). Cela n'implique cependant pas nécessairement que ces activations étaient non spécifiques ; une activation soutenue du putamen ayant été montrée comme caractéristique du geste d'écriture (par rapport au fait de tracer des zigzags par exemple ; Horowitz, Gallea, Najee-ullah, & Hallett, 2013).

De manière intéressante, un des trois pics d'activité de plus forte intensité au sein du cluster principal du premier contraste (« Ecriture vs. ligne de base ») semblait correspondre à l'aire GMFA gauche (coordonnées MNI : $x = -27$; $y = -9$; $z = 60$). Sa contrepartie droite apparaissait elle aussi, de manière remarquablement symétrique ($x = 27$; $y = -9$; $z = 57$) (ce pic n'émergeait pas sous la forme d'un cluster indépendant mais était inclus, comme l'aire motrice supplémentaire au niveau médial, dans le vaste cluster principal). Le caractère bilatéral de certaines aires corticales dans cette tâche d'écriture apparaissait aussi au niveau du lobule pariétal inférieur (BA 40) et, de manière plus étonnante, dans le gyrus frontal inférieur, au niveau de la jonction avec le gyrus précentral.

On note aussi l'activation d'aires moins fréquemment rapportées dans la littérature comme le gyrus frontal inférieur droit (pars opercularis), la jonction temporale supérieure/frontale inférieure gauche (pars opercularis) et le gyrus supramarginal. En réalité, le gyrus supramarginal est depuis longtemps associé à la phonologie dans l'écriture et la lecture (Beauvois & Derouesne, 1979; Roeltgen & Heilman, 1984), bien que peu souvent rapporté comme activé en neuroimagerie, il jouerait un rôle de première importance dans la production écrite (Sugihara et al., 2006). La localisation du pic que nous rapportons ici ($x = -57$, $y = -21$, $z = 15$), est en effet tout à fait proche d'un des trois « centres de l'écriture » rapportés par Sugihara et al. (2006) (celui de la conversion phonème-graphème ; $x = -54$, $y = -30$, $z = 24$). L'activation operculaire gauche est aussi tout à fait cohérente dans une activité linguistique telle que l'écriture, et a de plus été associée, en coopération avec le gyrus supramarginal justement, à la mémoire de travail phonologique, voire à la conversion graphème-phonème en lecture (Jobard et al., 2003). L'activation frontale inférieure droite est plus surprenante dans une tâche langagière réalisée par des sujets droitiers (et impliquant une activité motrice réalisée uniquement avec la main droite). Différentes hypothèses ont été proposées quant à la signification d'une telle activation dans une tâche langagière : traitement de la syntaxe, de la prosodie, phénomènes d'incongruence sémantique, processus annexes exécutifs ou de mémoire

de travail (Price, 2010; Vigneau et al., 2011). Les données présentées ici sont peu compatibles avec de telles hypothèses et nous permettent donc pas pour l'instant d'avancer d'explication fiable.

IV.2. Aires motrices et langagières de l'écriture

Le second objectif de cette étude était de répondre à des hypothèses quant au rôle fonctionnel des différentes aires de ce réseau, par le biais de contrastes ou de comparaisons entre une tâche d'écriture avec une tâche motrice manuelle non linguistique d'une part et avec une tâche linguistique non manuelle (orale) d'autre part. On constate tout d'abord que le contraste impliquant la tâche de répétition orale révèle un réseau d'activations très similaire au réseau global de l'écriture décrit précédemment (bien qu'à un seuil statistique moins strict). On peut en déduire que l'activité BOLD résultant du traitement des stimuli n'en constituait qu'une part très faible (puisque c'est ce qui est contrôlé par la tâche de répétition). Le réseau activé lors de l'écriture semblait donc de nature essentiellement « périphérique », il ne reflétait peu les demandes linguistiques de la tâche. Cette impression est renforcée par l'analyse de conjonction qui n'a pas permis d'identifier des aires communes aux deux tâches principales d'écriture et de répétition orale (chacune contrastée avec sa tâche contrôle motrice), qui impliquaient pourtant l'écoute et l'identification des mêmes mots. A un seuil statistique assez libéral, on constate tout de même des activations communes dans l'aire motrice supplémentaire, une aire effectivement impliquée dans une tâche motrice comme l'écriture (e.g. Beeson et al., 2003; Kato et al., 1999) tout comme dans la production de la parole (Alario, Chainay, Lehericy, & Cohen, 2006), et dans la pars opercularis du gyrus frontal inférieur, reflétant vraisemblablement le traitement phonologique comme nous l'avons déjà évoqué.

La tâche de traçage de créneaux n'a quant à elle pas fourni tous les résultats escomptés puisque une importante activation du cortex moteur primaire résulte du contraste Ecriture vs. Traçage de créneaux. Le rôle de l'essentiel des aires identifiées est ainsi en effet associé à la motricité : cortex moteur et sensori-moteur primaire, aire motrice supplémentaire et cervelet droit. Bien qu'on ne puisse écarter l'hypothèse d'un rôle « linguistique » d'une partie de ces aires (e.g. cervelet droit), il semble que ce résultat traduit principalement une plus grande mobilisation de la motricité dans la tâche d'écriture en comparaison avec la tâche de traçage de créneaux : en termes de « quantité de mouvement » (la différence du point de vue de durée de production dans chaque essai, bien que significative, était cependant minime, 40 ms), ou de manière plus probable, en termes de complexité du mouvement (écrire un mot implique une plus grande finesse, des mouvements plus rapides et plus complexes que la tâche de traçage

proposée à nos sujets). Un résultat semblable découle naturellement du contraste utilisant le masque exclusif « Répétition de mots vs. Répétition de syllabes », initialement conçu pour identifier les aires les plus spécifiques de l'écriture (i.e. concernant les processus lexico-orthographiques, allographiques et de mémoire de travail graphémique): forte activation du cortex moteur primaire et du cervelet droit. En réalité ce surcroît d'activation motrice primaire dans la tâche d'écriture par rapport au traçage de créneaux pourrait aussi découler de notre choix de travailler avec une tâche d'écriture cursive : les représentations associées à ce format d'écriture pourraient porter de l'information particulièrement liée au mouvement moteur, comme le suggèrent certaines données montrant des activations du cortex moteur primaire lors de la simple présentation visuelle de caractères d'écriture cursive (Longcamp, Hlushchuk, & Hari, 2011; Longcamp, Tanskanen, & Hari, 2006; voir aussi Wamain, Tallet, Zanone, & Longcamp, 2012).

On peut cependant constater qu'au niveau d'exigence statistique moins strict choisi, des activations plus cohérentes avec nos hypothèses émergent, dans le gyrus fusiforme notamment (pic à seulement 7mm de distance du pic identifié via la méta-analyse ; cortex temporal postérieur inférieur gauche). Cette aire, qui serait impliquée dans le lexique orthographique (Rapcsak & Beeson, 2004), est en effet souvent reportée activée lors de tels contrastes (i.e. écriture vs. tâche motrice) (e.g. Beeson et al., 2003). Sa spécificité à l'écriture, tel que suggéré par les résultats du contraste avec la tâche de traçage de créneaux, est toutefois contrebalancée par le constat de son absence dans le simple contraste « Ecriture vs. Répétition orale », traduisant peut-être un accès orthographique lié au traitement des stimuli et persistant dans la tâche orale (hypothèse soutenue par les résultats de l'analyse de conjonction où le gyrus fusiforme gauche apparaît, à un seuil statistique bas).

Le cortex prémoteur ventral gauche est une région importante pour l'écriture que nous retrouvons activée dans notre tâche d'écriture, et de manière différente selon les contrastes considérés. On observe en effet tout d'abord un pic à la jonction du gyrus précentral et du gyrus frontal inférieur ($x = -54, y = 3, z = 33$) apparaissant plutôt spécifique de la production écrite puisque présent à la fois lorsque la tâche d'écriture est comparée au repos, à la tâche de traçage, ou à la tâche de répétition orale. Ce résultat est illustré par l'estimation de la variation de signal selon la tâche mesurée sous SPM (Figure VII-9). Un pic plus inférieur, dans la pars opercularis ($x = -45, y = 6, z = 18$), résultant du contraste « Ecriture vs. Traçage de créneaux », semble présenter un profil similaire. Pourtant, celui-ci n'apparaissait plus de manière significative dans les résultats lorsqu'étaient exclus les voxels activés dans le contraste issu de la tâche de répétition (masque exclusif « Répétition de mots vs. répétition de syllabes »), mettant en doute sa réelle spécificité à l'écriture. Un troisième pic, à la jonction avec le sillon temporal supérieur ($x = -51, y$

= 12, $z = -3$) suggère lui clairement un profil « linguistique » : activé identiquement dans les tâches d'écriture et de répétition orale de mots.

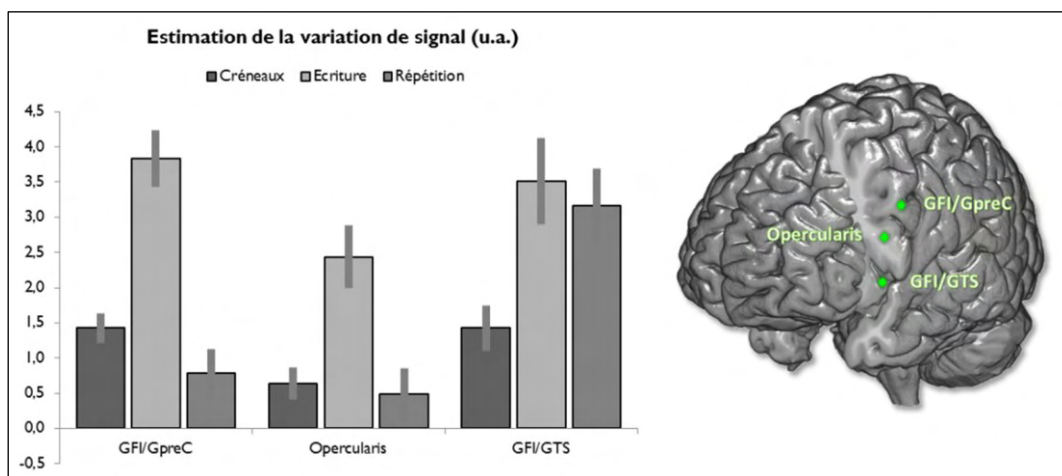


Figure VII-9 : Estimation de la variation de signal BOLD selon le type de tâche dans 3 voxels (unités arbitraires): GFI/GpreC (gyrus frontal inférieur / gyrus précentral) ; Opercularis (pars opercularis du gyrus frontal inférieur) ; GFI/GTS (gyrus frontal inférieur / gyrus temporal supérieur).

Ces données suggèrent une hétérogénéité du rôle fonctionnel du cortex prémoteur ventral et frontal inférieur dans l'écriture ; alors que les activations prémotrices inférieures semblent bien spécifiques de l'écriture (peu actives dans une tâche graphomotrice simple comme le traçage de créneaux), plusieurs fractions du gyrus frontal inférieur seraient impliquées dans l'écriture comme dans d'autres tâches langagières. Au-delà des fonctions linguistiques multiples et très documentées du gyrus frontal inférieur et de la pars opercularis en particulier (e.g. Price, 2012; Vigneau et al., 2006), de semblables dissociations dans cette région ont en effet déjà été mises en évidence entre l'écriture sur clavier et la lecture (Purcell et al., 2011a). Nos données apparaissent donc compatibles avec l'hypothèse d'une contribution du cortex prémoteur ventral au processus de conversion des phonèmes en graphèmes (formulée notamment suite aux résultats de Omura et al., 2004) ainsi qu'avec l'hypothèse alternative d'un rôle dans le lexique orthographique (Rapp & Dufor, 2011). La question de la localisation précise de l'aire étudiée reste manifestement cruciale pour proposer des hypothèses quant à son rôle fonctionnel dans l'écriture.

IV.3. Aires cruciales pour l'écriture ?

IV.3.1. Le cortex pariétal supérieur

Le cortex pariétal supérieur/inférieur gauche ensuite est bien une région importante dans la production écrite, tel que le confirment les résultats des différents contrastes. Il demeure

pourtant difficile d'en identifier un centre unique : les clusters concernés (dans les contrastes par rapport à la tâche de traçage et à la tâche de répétition orale) incluent des voxels s'étendant dans le gyrus postcentral, le lobule pariétal inférieur et le lobule pariétal supérieur. Deux pics d'intensité maximale communs sont identifiables dans des analyses restreintes au cluster fronto-pariétal gauche réalisées sur ces deux contrastes : gyrus postcentral (BA 40 ; $x = -36, y = -42, z = 57$) et lobule pariétal supérieur (BA 7 ; $x = -27, y = -57, z = 60$). L'activation de cette région dans l'écriture émerge plus favorablement lors du contraste avec une tâche non manuelle comme la répétition orale, mais reste toujours significativement plus active dans le contraste avec la tâche motrice. Une telle distinction est compatible avec l'hypothèse d'un contrôle sensori-moteur de la production qui serait toujours présent, bien que dans une moindre mesure, dans la tâche de traçage de créneaux. Nos données s'accordent donc avec les nombreuses données de la littérature attestant du rôle crucial dans l'écriture de cette région (e.g. Auerbach & Alexander, 1981; Magrassi et al., 2010; Sakurai et al., 2007), dont on peut soupçonner une fonction associée au contrôle moteur, mais la nature de ce rôle comme la localisation précise des territoires corticaux impliqués reste incertaine.

IV.3.2. GMFA et sensibilité à la longueur orthographique

Enfin, nous avons soumis l'hypothèse que la GMFA jouerait un rôle crucial dans l'écriture, un rôle d'interface entre la représentation orthographique des mots et les programmes moteurs, ou dans le stockage temporaire de cette représentation (i.e. le buffer graphémique). La sensibilité à la longueur des mots, indépendamment de la durée de l'activité motrice, est un indice de l'implication du buffer graphémique (des mots plus longs sollicitant davantage le buffer graphémique, voir par exemple Hillis & Caramazza, 1989). Nous ne sommes pas parvenus à démontrer une telle sensibilité dans le cortex préfrontal ou plus largement dans le réseau de l'écriture (i.e. lors de contrastes réalisés avec un masque inclusif « Ecriture vs. Ligne de base »). Au niveau de cerveau entier, seules deux aires de l'hémisphère droit apparaissaient davantage sollicitées lors de la tâche d'écriture de mots courts (2 syllabes) que lors de la tâche d'écriture de mots longs (3 syllabes) : le lobule pariétal supérieur droit, une aire traditionnellement associée au contrôle attentionnel ou visuo-spatial (Corbetta & Shulman, 2002), et le cuneus, une aire du cortex occipital plutôt associée au traitement de l'information visuelle. Au-delà de la question du stockage temporaire de la représentation orthographique, ce résultat pourrait s'expliquer par la nécessité de mieux prendre en compte l'espace graphique lors de l'écriture des mots courts dans notre tâche, du fait de retours à la ligne plus fréquents : les sujets étant invités à écrire autant de fois que possible le mot entendu dans le délai imparti

(durée de l'essai de 6 secondes), les mots plus courts étaient écrits davantage de fois (les sujets étaient de plus encouragés à faire des retour à la ligne après chaque mot pour éviter des mouvements trop amples). Une sensibilité à la longueur des mots dans le cortex préfrontal a pourtant déjà observée par Rapp et Dufor (2011), dans une région du sillon frontal supérieur pouvant correspondre à la GMFA (ainsi que, dans une moindre mesure, dans une aire du cortex pariétal supérieur). En effet, dans la tâche d'écriture sous dictée de cette expérimentation en IRMf, les participants devaient écrire chaque mot entendu de manière continue pendant une durée 6 secondes. Des mots longs (8 lettres) ou courts (4 lettres) étaient notamment utilisés. Cependant, contrairement à notre étude, les participants avaient ici pour instruction d'écrire les lettres les unes au-dessus des autres, en caractères d'imprimerie majuscules. Ainsi, on peut postuler que les différences entre nos résultats et ceux obtenus par Rapp et Dufor (2011), malgré des tâches très semblables, puissent s'expliquer (au-delà des variations méthodologiques dans l'acquisition et l'analyse des données) par le fait que la tâche utilisée par ces derniers sollicite davantage le buffer graphémique : chaque lettre est produite de manière relativement indépendante et probablement de manière moins automatisée que lors de l'écriture usuelle. En outre, certains travaux de neuropsychologie étudiant la forme « allographique » d'agraphie périphériques proposent une représentation qualitativement différentes des lettres en majuscules d'imprimerie (en termes de traits) et des lettres en minuscule de l'écriture cursive (de manière globale) (Di Pietro, Schnider, & Ptak, 2011). On peut ainsi suggérer que l'écriture cursive utilisée ici ait été moins coûteuse que ne l'aurait été une tâche d'écriture lettre à lettre en majuscule d'imprimerie.

La GMFA était une des aires les plus fortement actives lors de la tâche d'écriture (3ème pic en valeur de T dans le contraste avec le repos). Sa localisation au niveau individuel, en vue de l'expérimentation utilisant la rTMS (cf. Chapitre IX), pourra donc être aisément réalisée. Bien que nous n'ayons pas pu vérifier notre hypothèse quant à son rôle fonctionnel, elle demeure une aire dont l'activation persiste quelle que soit la tâche contrôle. Dès lors que la tâche contrôle de traçage de créneaux s'est avérée globalement inefficace pour contrôler tous les aspects moteurs de la tâche d'écriture, il est difficile d'en conclure un rôle non moteur de la GMFA (on peut même constater dans une moindre mesure son activation dans la seule tâche de traçage de créneaux). Néanmoins, son caractère manifestement bilatéral (bien que la nature du signal BOLD ne nous permette pas d'écarter l'hypothèse que cette activité droite résulte d'un phénomène d'inhibition interhémisphérique) suggère un rôle dans l'écriture en amont de l'exécution motrice proprement dite (car seule la main droite était en mouvement), compatible avec les processus allographiques ou de sélection des engrammes moteurs correspondant aux lettres.

IV.4. Conclusion

Les résultats de ce travail en IRMf sont dans l'ensemble compatibles avec les résultats de la méta-analyse et les conclusions qui en résultaient. On retrouve un réseau de l'écriture chez le sujet sain centré sur les cortex frontaux et pariétaux supérieurs gauches, avec la présence d'activations sous corticales, du cervelet droit, mais aussi dans l'hémisphère droit (cortex frontal et pariétal). On distingue des composantes motrices ou associées au contrôle moteur de l'écriture : cortex moteur et sensori-moteur primaire, aire motrice supplémentaire, cervelet droit ; et des composantes plutôt associées aux processus linguistiques à l'œuvre dans l'écriture : gyrus fusiforme gauche, région frontale inférieure gauche. Les fonctions cognitives précises sous-tendues par les activations d'au moins quatre régions apparaissant cruciales pour l'écriture restent toutefois encore obscures : c'est le cas de la GMFA, située au niveau de la partie postérieure du sillon frontal supérieur (dont nous ne sommes pas parvenus à établir un lien avec le buffer graphémique), du cortex pariétal supérieur et du cortex prémoteur ventral / frontal inférieur (plusieurs pics pourraient relever de plusieurs fonctions distinctes) ou encore du cervelet droit.

CHAPITRE VIII : EXPERIMENTATION IRMf 2 : EFFETS D'AGE D'ACQUISITION EN DENOMINATION ECRITE

I. INTRODUCTION

La précédente expérimentation en IRMf a permis de confirmer l'implication dans le processus d'écriture d'un certain nombre d'aires cérébrales. Pourtant, nous ne sommes pas parvenus à établir une distinction claire entre les composantes centrales et les composantes périphériques. Les tâches (auditives) d'écriture sous dictée et d'épellation orale n'ont par exemple présenté que très peu d'activations communes, même à un seuil statistique peu élevé. Il a ainsi été difficile à dégager les aires dédiées au traitement phonologique et sémantique des mots entendus. Nous pensons que cette difficulté résulte de plusieurs problèmes auxquels nous espérons remédier ici en utilisant une tâche (visuelle) de dénomination écrite d'images. Pour des raisons techniques tout d'abord ; en effet la tâche auditive nécessitait une interruption de l'acquisition du signal pour permettre la présentation des stimuli. Bien que nous utilisions un paradigme en blocs, une telle interruption affectait la qualité du signal et était mal modélisée par le GLM. Une tâche visuelle permet de conserver une acquisition de signal continue. Pour des raisons théoriques ensuite ; les modèles cognitifs de la production du langage restent incertains quant à la nécessité d'accéder à la représentation sémantique dans des tâches sur entrée auditive (cf. Chapitre I.II.1.2). Les tâches de répétition et de dictée ont pu impliquer l'emprunt de « chemins » complètement distincts dès les premières étapes de traitement (voir Figure VII-1, chapitre précédent).

La tâche de dénomination écrite d'images utilisée dans cette seconde expérimentation implique ainsi, à partir des représentations structurales visuelles du dessin présenté, l'accès à la représentation sémantique puis lexico-orthographique du mot à produire (voir Figure VIII-1). Plutôt que d'employer une tâche contrôle linguistique de simple dénomination orale, qui ne nécessite pas de mobiliser la moindre représentation orthographique, nous avons souhaité introduire une tâche d'épellation orale. La tâche d'épellation est, comme l'écriture, une tâche orthographique. Elle implique de plus de mobiliser le buffer graphémique, le stockage temporaire de la représentation orthographique ou graphémique étant nécessaire pendant la récupération et la production du nom des lettres (voir Figure VIII-1). Cette tâche contrôle permet ainsi de fixer la distinction entre processus centraux et périphériques au-delà du niveau

du buffer graphémique (i.e. isoler le système allographique, la sélection des schèmes moteurs et les processus d'exécution motrice et de contrôle moteur manuel), ce qui n'est permis par aucune autre tâche. Nous postulons ainsi que les aires impliquées dans le buffer graphémique (e.g. hypothèse du rôle de la GMFA), ainsi que dans les processus orthographiques en amont soient communément activées par les tâches d'écriture et d'épellation.

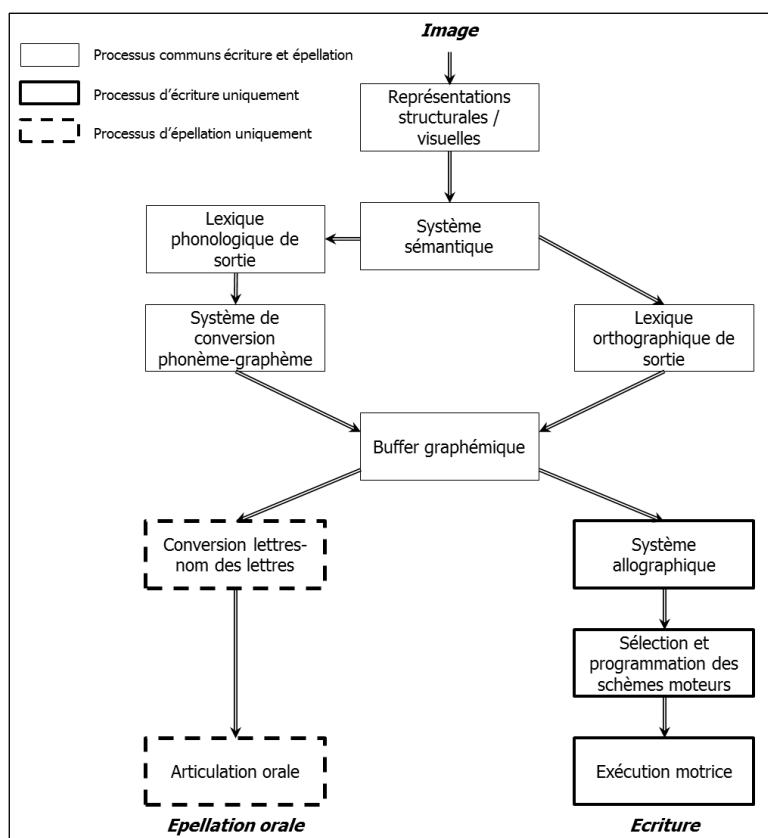


Figure VIII-1 : Schéma des processus cognitifs impliqués dans les tâches de dénomination écrite et d'épellation utilisées dans l'expérimentation IRMf 2 (adapté de Bonin, 2003)

Au-delà de l'identification des composantes centrales et périphériques du réseau de l'écriture nous souhaitons à travers ce travail tester une hypothèse relative à l'accès lexical en production écrite au travers de l'effet d'âge d'acquisition des mots (AoA). En effet, les recherches en psycholinguistique ont montré que l'âge d'acquisition des mots écrits avait un impact significatif sur le comportement (e.g. latences plus courtes pour les mots acquis précocement) et que cet effet était indépendant de l'effet de fréquence lexicale (e.g. Bonin et al., 2001a) (cf. Chapitre I). Bien que l'origine de cet effet reste discutée, il traduirait une facilitation de la récupération lexicale orthographique (à partir de la représentation sémantique) ou de la récupération de la représentation phonologique. Rapp et Dufor (2011) ont étudié en IRMf l'effet de la fréquence lexicale en écriture sous dictée et montré que le cortex prémoteur ventral, le

cortex cingulaire antérieur, le putamen ou encore le cortex temporal postérieur inférieur étaient sensibles à la différence de fréquence des mots écrits. Ces aires étant donc associées au lexique orthographique, celui-ci étant considéré comme organisé sur la base de la fréquence (les mots les plus fréquents sont plus facilement récupérés). Nous avons vu que les effets comportementaux de la fréquence lexicale pouvaient être confondus avec des effets d'âge d'acquisition (Bonin, 2005), c'est pourquoi nous avons voulu ici étudier l'effet d'âge d'acquisition en tant que tel. Ainsi nous espérons examiner le rôle fonctionnel de deux aires associées au processus centraux à l'œuvre dans l'écriture : la région temporelle postérieure inférieure gauche, plutôt associée au lexique orthographique, et la région prémotrice ventrale ou frontale inférieure, plutôt associée à la voie phonologique. La production des mots acquis plus tardivement étant supposée davantage reposer sur la procédure de conversion. En outre, si un tel effet était mis en évidence, l'utilisation des mêmes stimuli dans la tâche d'épellation et dans la tâche de dénomination écrite nous permettra de conclure sur la nature de ce celui-ci : effet relevant des niveaux de traitement centraux (les aires sensibles à l'AoA sont les mêmes dans les deux tâches) ou effet relevant des niveaux de traitement périphériques (les aires sensibles à l'AoA sont restreintes au réseau de l'écriture manuscrite).

Dans notre précédente expérimentation, le résultat de la comparaison de la tâche d'écriture avec la tâche de traçage de créneaux, plutôt que d'uniquement révéler des aires traditionnellement associées à la production orthographique du langage a semblé surtout mettre en évidence une complexité motrice supérieure de la tâche d'écriture (e.g. cortex moteur primaire, aire motrice supplémentaire, cervelet droit). Une solution adoptée par plusieurs auteurs consistait en l'emploi d'une tâche motrice faiblement demandeuse en ressources et très focalisée sur le cortex moteur (e.g. tâche de *finger tapping*) mais nous pensons que de telles tâches ne permettent pas d'établir une réelle distinction entre processus spécifiques de l'écriture et processus simplement liés au contrôle moteur et pouvant aussi bien être engagés dans toute tâche motrice manuelle d'une complexité suffisante. Ainsi nous avons voulu comparer dans notre expérimentation le réseau de l'écriture à celui d'une tâche graphique non orthographique d'une complexité équivalente (ou supérieure) ; une tâche de dessin d'objets. Le dessin, dont les troubles ont pu être mis en évidence dans certaines formes d'apraxie (e.g. Gainotti & Tiacci, 1970), a rarement été utilisé en neuroimagerie. Les quelques travaux disponibles ont cependant mis en évidence l'implication bilatérale du cortex pariétal dans cette compétence (e.g. Makuuchi, Kaminaga, & Sugishita, 2003). Le choix de cette tâche, dans laquelle les sujets devaient reproduire la forme globale de l'image présentée, était aussi motivé par la possibilité d'utiliser des stimuli identiques que dans les tâches d'écriture et d'épellation, permettant ainsi de contrôler les activations corticales visuelles de manière optimale.

Cette seconde expérimentation en IRMf comportait donc plusieurs objectifs :

- Mettre en évidence le réseau de l'écriture manuscrite dans une tâche de dénomination écrite d'images (incluant la GMFA et le cortex pariétal supérieur) et distinguer les aires linguistiques/centrales, motrices/périphérique et spécifiques de l'écriture.
- Identifier les aires relatives à l'accès orthographique à partir d'une image incluant le buffer graphémique (quelle que soit la nature de la sortie).
- Comparer les activations cérébrales de la tâche d'écriture avec celles d'une tâche motrice non langagière d'une complexité au moins équivalente.
- Identifier les aires sensibles à l'âge d'acquisition des mots produits (et vérifier l'hypothèse d'une telle sensibilité dans le cortex prémoteur ventral et/ou le cortex temporal postérieur inférieur)

La réalisation de ce protocole a nécessité de résoudre certains problèmes et d'évaluer au préalable sa faisabilité. En effet, puisque nous souhaitons utiliser une tâche de dénomination écrite d'images, les stimuli disponibles (dont certaines propriétés ont été mesurées et publiées dans la littérature ; e.g. Alario & Ferrand, 1999; Bonin, Peereman, Malardier, Méot, & Chalard, 2003; Snodgrass & Vanderwart, 1980) étaient en nombre beaucoup plus restreint que lorsque nous utilisons une tâche de dictée. Il nous fallait être en mesure de sélectionner des stimuli qui suscitent la même réponse écrite chez tous les sujets (e.g. « table » lorsque l'image d'une table est présentée), qui puissent être classées en deux catégories selon leur âge d'acquisition (précoce vs. tardif), tout en les contrôlant sur d'autres variables telles que la longueur orthographique et surtout la fréquence lexicale (pour que nos effets soient seulement attribuables à l'âge d'acquisition des mots produits). C'est donc en vue d'être en mesure de sélectionner de tels stimuli que nous avons conduit une expérimentation préliminaire de dénomination écrite d'images hors IRM. Une tâche de reproduction d'images par le dessin a aussi été réalisée dans le but d'évaluer la faisabilité d'une telle tâche en tenant compte des contraintes de l'expérimentation IRM (tel que la courte durée de chaque essai).

II. EXPERIMENTATION COMPORTEMENTALE PRELIMINAIRE

Deux études comportementales préliminaires, de dénomination écrite d'images et de dessin (reproduction d'images présentées visuellement) ont donc été conduites chez un groupe de volontaires hors IRM. Les objectifs communs de ces deux tâches étaient de sélectionner des stimuli induisant des réponses comportementales compatibles avec leur transposition dans une

expérimentation en IRMf avec durée d'essai fixe. Par ailleurs, l'influence éventuelle des caractéristiques linguistiques des items (i.e. des images ou des mots-cibles) sur les différents paramètres comportementaux de la réponse (e.g. temps de réaction, vitesse de production), et donc sur les processus cognitifs sous-jacents, a été examinée. Nous souhaitons aussi au travers de cette expérimentation reproduire des effets de l'âge d'acquisition sur les latences en dénomination écrite d'images, à la suite de Bonin et al. (2002). La réalisation de la tâche de dessin avait aussi pour objectif de vérifier la capacité de participants n'ayant aucune compétence particulière en dessin à reproduire grossièrement des images présentées visuellement dans un délai court.

II.1. Tâche de dénomination écrite

II.1.1. Participants

15 volontaires (étudiants et membres du laboratoire) droitiers et de langue maternelle française ont participé à cette expérimentation.

II.1.2. Stimuli

100 images (dessins au trait) ont été sélectionnées, suivant des critères définis ci-après, parmi un ensemble de 400 images standardisées (Alario & Ferrand, 1999), en vue de la tâche de dénomination écrite. Afin d'obtenir pour chaque image la même réponse écrite chez tous les participants, la valeur standardisée d'accord image-nom de l'image (*name agreement*) des images sélectionnées était d'au moins 80% (i.e. pourcentage de participants proposant une même réponse en réponse à une même image). Par ailleurs, pour éviter une trop grande dispersion dans les durées d'écriture, les mots-cibles (i.e. noms des images) comportaient entre 4 et 7 lettres, pour 1 ou 2 syllabes. Plusieurs exemples de stimuli sont notamment présentés Annexe 6.1.

Table VIII-1 : Propriétés des 100 items sélectionnés (i.e. images, puis mots-cibles correspondants)

	Accord image-nom de l'image (%)	Accord nom de l'image-image (/5)	Familiarité (/5)	Complexité du dessin (/5)		
Moyenne	96,2	3,5	2,7	3,5		
Écart-type	4,8	0,6	1,1	0,7		

	Nombre de lettres	Nombre de syllabes	Âge d'acquisition (/5)*	Fréquence lexicale (livres)**	Fréquence moyenne des bigrammes (token)**	Fréquence moyenne des trigrammes (token)**
Moyenne	5,6	1,6	2,2	43,8	7276	953
Écart-type	1,1	0,5	0,6	108,5	3144	900

* Échelle en 5 points allant de 1 : acquis entre 0 et 3 ans, à 5 : acquis après 12 ans (intervalles de 3 ans)

** Données issues de Lexique 3.80 (New et al., 2001)

II.1.3. Dispositif

Les images étaient présentées sur l'écran d'un ordinateur portable HP EliteBook 8440p (Windows 7) en utilisant le logiciel Eye and Pen 1.1 (Chesnet & Alamargot, 2005). Les réponses écrites étaient récoltées via une tablette graphique Wacom Intuos3 A4 (Wacom, Krefeld, Germany) accompagnée d'un stylo à bille (Ink pen ZP-130, Wacom). Une feuille de papier A4 avec 50 cadres rectangulaires était placée sur la tablette pour recueillir les réponses (deux feuilles étaient donc suffisantes pour écrire les 100 mots). Un enregistrement continu de la production (à une fréquence de 200 Hz) était réalisé grâce au logiciel Eye and Pen, permettant une récupération ultérieure des latences et des durées d'écriture à la milliseconde près, ainsi que des mesures de la distance couverte par le stylo.

II.1.4. Procédure

Dans chaque essai, une croix de fixation était présentée au centre de l'écran pour une durée de 1000 ms, puis était immédiatement suivie d'une image. Les participants avaient pour instruction d'écrire dans l'emplacement réservé le nom de l'image présentée, le plus rapidement possible après son apparition. Ils devaient ensuite presser un bouton (avec leur main gauche) pour déclencher le début de l'essai suivant (aucune contrainte temporelle n'était donc présente quant à la durée de chaque essai). Les participants étaient invités à se mettre en position « prêt à écrire » avant de presser ce bouton, afin que les temps de réactions mesurés soient le moins possible affectés par le mouvement initial de la main. Ils avaient pour instruction d'écrire de façon usuelle (écriture cursive), en minuscules, mais d'écrire chaque mot d'une traite, sans jamais revenir en arrière (toute correction de sa production, même immédiate, était proscrite).

La réalisation de la tâche était précédée d'une phase de familiarisation avec le dispositif lors de laquelle 8 items étaient présentés.

II.1.5. Analyses et résultats

Les latences d'écriture, en tant que durée entre le moment de la présentation de l'image et le premier contact du stylo sur la tablette, ont été extraites des enregistrements Eye and Pen. Des mesures de pression exercée par le stylo sur la tablette (unités arbitraires), de durée d'écriture ainsi que de distance (en unités tablettes, converties en cm) ont aussi été exportées pour chaque mot écrit. La vitesse d'écriture moyenne de chaque mot est ensuite obtenue par simple division mathématique de la distance par la durée.

Pour chaque item, la médiane des valeurs obtenues par les sujets dans les essais corrects a été calculée dans toutes les variables d'intérêt. Les moyennes, écart-types, minimums et maximums sont présentés dans la Table VIII-3 (section suivante).

Des analyses de régression multiple ont été successivement conduites sur les latences, les durées d'écriture, les vitesses moyennes et les pressions moyennes, afin de d'identifier les relations entre les caractéristiques des stimuli (i.e. des images et des mots produits) et nos différentes variables comportementales mesurées. Les variables prédictrices incluses dans l'analyse étaient l'accord image-nom de l'image, l'accord nom de l'image-image (i.e. il s'agit d'un jugement du degré d'accord d'une image par rapport à l'image mentale que se font des participants lorsque son nom est présenté), la familiarité, la complexité du dessin, l'âge d'acquisition, la fréquence lexicale, le nombre de lettres, la fréquence moyenne des bigrammes et la fréquence moyenne des trigrammes. Les valeurs de p (pour déterminer la significativité) et η^2 (indiquant la proportion de variance expliquée) sont rapportées.

L'analyse sur les latences (coefficient de détermination R^2 ajusté = 0,38) a révélé trois prédicteurs significatifs : l'âge d'acquisition ($p < .0001$; $\eta^2 = 0,19$; relation illustrée dans le graphique de la Figure VIII-2), l'accord image-nom de l'image ($p < .001$; $\eta^2 = 0,12$) et l'accord nom de l'image-image ($p < .02$; $\eta^2 = 0,07$). L'analyse sur les durées (R^2 ajusté = 0,75) a révélé le nombre de lettres comme seul prédicteur significatif ($p < .0001$; $\eta^2 = 0,74$). Les données incluses dans l'analyse sur les vitesses et l'analyse sur les pressions moyennes ne permettaient pas d'aboutir à un modèle de régression significatif (R^2 ajusté = 0,06 ; $p = .10$ pour les vitesses et R^2 ajusté = -0,04 ; $p = .79$ pour les pressions moyennes).

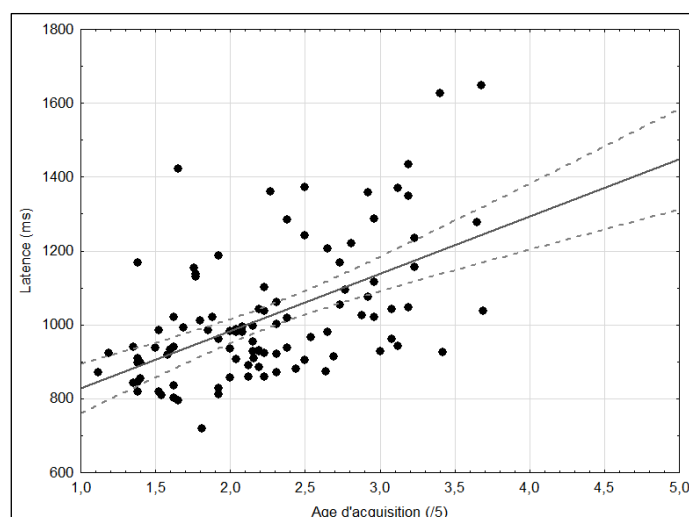


Figure VIII-2 : Relation linéaire entre l'âge d'acquisition des mots (score sur 5, en abscisse) et les latences d'écriture moyennes relevées dans la tâche de dénomination (en ordonnée).

II.2. Tâche de dessin

Afin de sélectionner des stimuli pour la tâche de dessin en IRMf (i.e. reproduction rapide et grossière d'une image présentée visuellement) qui soit comparable à la tâche d'écriture tant sur le plan des stimuli (dessins au trait issus de la même base de données) que de l'activité motrice (e.g. durée et vitesse de production équivalente), une expérimentation utilisant une tâche de dessin a été conduite sur tablette graphique hors IRM. Cette expérimentation a permis une analyse fine des données comportementales produites lors d'une telle tâche (la grande précision temporelle obtenue ou le recueil de variables telles que la pression du tracé n'est pas permise par le matériel qui sera utilisé lors de l'expérimentation en IRMf).

II.2.1. Participants

Le même groupe de 15 participants ayant effectué la tâche de dénomination écrite a effectué cette tâche de dessin.

II.2.2. Stimuli

Afin de faciliter la réalisation de cette tâche de reproduction d'images, n'ont été sélectionnées parmi les 400 images (dessins au trait) de la base d'Alario et Ferrand (1999) que des images d'une complexité visuelle inférieure à 2,5 sur 5 et n'ayant pas été sélectionnées pour la tâche précédente de dénomination écrite. Les 50 images sélectionnées (représentant divers

objets du quotidien, végétaux ou animaux) avaient une complexité visuelle moyenne de 2,0 (écart-type : 0,4) et une familiarité de 3,5 (écart-type : 1,1).

II.2.3. Dispositif

Le même dispositif que précédemment, constitué d'un ordinateur portable et d'une tablette graphique permettant de recueillir la production via le logiciel Eye and Pen, était placé face au sujet. La production était réalisée directement sur la tablette (sans l'intermédiaire d'une feuille de papier comportant des cases distinctes), et sans retour visuel de son propre tracé (qui n'était ni visible sur la tablette, ni affiché à l'écran) via un stylet dédié (Grip pen ZP-501, Wacom). Ce dispositif était conçu pour se rapprocher davantage des conditions de l'expérimentation en IRMf (de plus, contrairement à la tâche d'écriture précédente, nous ne souhaitons pas ici reproduire des résultats publiés dans la littérature).

II.2.4. Procédure

La présentation de chaque image était précédée d'une croix de fixation au centre de l'écran pour une durée de 1000 ms. Les participants avaient pour consigne de commencer à reproduire l'image le plus rapidement possible après son apparition. Celle-ci restait affichée à l'écran jusqu'à la pression sur un bouton par le sujet (avec sa main gauche), signalant la fin de sa production et déclenchant le début de l'essai suivant (la production n'était donc, là encore, pas temporellement contrainte). Les instructions données au sujet étaient de « reproduire de manière rapide la forme générale de l'image présentée, sans tenir compte des détails », et ce, en fixant l'image du regard (sans regarder sa main). Une phase d'entraînement permettait au sujet de se familiariser avec le dispositif et à l'expérimentateur de préciser les consignes si nécessaire (e.g. « plus rapide », « moins de détails », etc.).

II.2.5. Analyses et résultats

Comme précédemment les latences, durées de production, durées d'essai, distances, vitesses et pressions moyennes de chaque essai étaient extraites des enregistrements Eye and Pen. Pour chacune des variables comportementales, la médiane de valeurs obtenues par les sujets pour chaque item a été calculée. La moyenne de ces valeurs sur l'ensemble de ces items, ainsi que celles de la tâche d'écriture précédente est rapportée dans la Table VIII-2 ci-après. Il

faut noter que les tâches de dessin et de dénomination écrite présentaient des contraintes différentes (i.e. case d'environ 8 cm² pour l'écriture contre surface libre sur la tablette pour le dessin) ainsi que l'utilisation d'un matériel différent (stylo à encre vs. numérique), ce qui limite leur comparaison sur des paramètres tels que la distance, la vitesse du tracé ou la pression exercée.

Table VIII-2 : Performances sur les différentes variables dans les tâches de dénomination écrite et de dessin

	Latence (ms)	Durée de production (ms)	Durée de l'essai (ms)	Distance (mm)	Vitesse moyenne (cm/s)	Pression (u.a.)	Taux de bonnes réponses (%)
Tâche de dénomination écrite							
Moyenne (écart-type)	1021 (180)	1876 (386)	2927 (471)	66 (14)	3,4 (0,3)	397 (31)	89,7
Minimum	720	1164	2108	38	2,8	249	13,3
Maximum	1647	2724	4402	95	4,3	463	100,0
Tâche de dessin							
Moyenne (écart-type)	1127 (191)	3309 (919)	4573 (1131)	240 (80)	7,0 (1,8)	770 (37)	n.a.
Minimum	787	1692	2563	108	4,6	667	n.a.
Maximum	1725	5628	7602	471	12,6	832	n.a.

A titre exploratoire, des analyses de régression multiple ont été successivement conduites sur les latences, les durées de production, les vitesses moyennes et les pressions moyennes obtenues lors de la tâche de dessin. Les variables prédictrices incluses dans l'analyse étaient l'accord image-nom de l'image, l'accord nom de l'image-image, la familiarité, la complexité du dessin, l'âge d'acquisition et la fréquence lexicale.

Aucun de ces modèles de régression n'apparaissait significatif.

Des tendances non significatives apparaissaient cependant dans l'analyse des durées de production (R^2 ajusté = 0,12 ; $p = .070$), signalant un effet de la complexité de l'image ($p < .003$; $\eta^2 = 0,19$; relation illustrée dans le graphique de la Figure VIII-3) et dans l'analyse des vitesses (R^2 ajusté = 0,12 ; $p = .077$), signalant des effets de la complexité de l'image ($p < .02$; $\eta^2 = 0,14$), de l'âge d'acquisition ($p < .02$; $\eta^2 = 0,12$) et de la familiarité ($p < .05$; $\eta^2 = 0,09$).

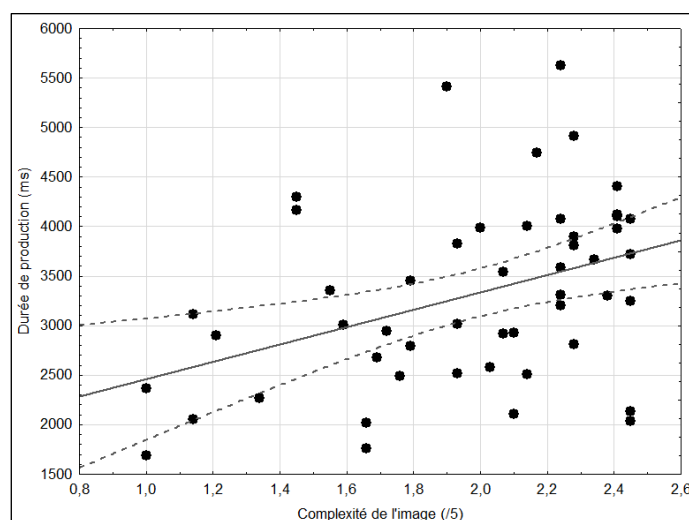


Figure VIII-3 : Relation linéaire entre la complexité de l'image (en abscisse) et les durées de production moyennes relevées dans la tâche de dessin (en ordonnée).

II.3. Conclusion

Les résultats de la tâche de dénomination écrite ont révélé une certaine disparité dans les performances malgré une sélection préalable ; certains items génèrent des durées d'essais trop longues et des taux de réponses correctes trop bas (10 items ont notamment été échoués par plus d'1/3 des participants) et pourront être exclus lors de la constitution des listes de l'expérimentation ultérieure. Les analyses de régression ont montré que les latences étaient significativement déterminées par l'âge d'acquisition des mots ainsi que par la « force de l'association » de l'image avec le mot cible (bien que la taille de ces effets était modeste). La fréquence lexicale n'apparaissait pas comme un prédicteur significatif du comportement ce qui renforce notre volonté de travailler avec l'âge d'acquisition plutôt qu'avec la fréquence lexicale en tant qu'indice de la « familiarité » des mots à produire.

Les performances des participants à la tâche de dessin soulignent la faisabilité d'une telle tâche graphique non linguistique en tant que tâche contrôle en IRMf. Les temps de réactions étaient comparables avec ceux de la tâche d'écriture et ne semblaient pas influencés par des variables linguistiques (telles que la familiarité du concept, ou la fréquence lexicale du mot). Les durées de production, sans contrainte temporelle fixe, se sont révélées manifestement différentes entre les deux tâches. Une sélection avisée des stimuli ainsi que des consignes adaptées à l'utilisation d'une durée d'essai restreinte permettront cependant d'améliorer la comparabilité entre celles-ci, s'agissant de la durée d'activité motrice.

III. EXPERIMENTATION IRMf 2 : MATERIEL ET METHODE

III.1. Sélection des stimuli : tâche de dénomination écrite

L'objectif de l'expérimentation préliminaire de dénomination écrite d'image était de permettre la sélection d'items favorable à leur utilisation en IRM, en se basant sur différents critères : même réponse pour tous les participants (taux d'erreur, erreurs orthographiques comprises, inférieur à 20%), durée de l'essai homogène selon les items et brève (somme de la latence et de la durée d'écriture comprise entre 2000 et 4000 ms), items ne suscitant pas de valeurs extrêmes sur les différentes variables comportementales annexes (e.g. distance du tracé inférieure à 4 cm ou supérieure à 10 cm).

Ensuite il s'agissait de construire deux listes d'items pour étudier la variable « âge d'acquisition ». Cette variable étant souvent confondue avec la fréquence lexicale, une attention toute particulière a été portée à préserver une absence de différence en termes de fréquence lexicale entre une liste « Age d'acquisition précoce » et une liste « Age d'acquisition tardif ». Par ailleurs, nous avons cherché à contrôler plusieurs variables relatives aux images : complexité du dessin, accord image-nom de l'image, accord nom de l'image-image, familiarité, et relatives au mot à écrire : fréquence lexicale, nombre de lettres, nombre de syllabes, fréquence des bigrammes et fréquence des trigrammes.

La Table VIII-3 récapitule les propriétés des items des deux listes, qui comprenaient 35 items chacune (soit 70 images sur les 100 images initiales), et rapporte les résultats de leur comparaison statistique (test T de Student). La liste des items (ainsi que ceux de la tâche de dessin), incluant quelques exemples d'images, est disponible Annexe 6.1. La différence en termes d'âge d'acquisition des deux listes (correspondant grossièrement à des âges d'acquisition moyens de 4-5 ans contre 7-8 ans) était significative ($t(68) = -9,42, p < .0001$). Une tendance apparaissait sur la variable de familiarité ($t(68) = 1,97, p = .053$), celle-ci étant corrélée avec l'âge d'acquisition (Alario & Ferrand, 1999). La différence de latence moyenne des mots constituant les deux listes (latences obtenues lors de l'expérimentation préliminaire) était aussi significative (mettant en évidence le fort impact de l'âge d'acquisition sur cette variable). Conformément à nos attentes la différence de fréquence lexicale moyenne (« Fréquence Livres », Lexique 3.80 ; 24,0 vs. 19,6 par million d'occurrences) n'était pas significative ($t(68) = 0,79, p = .432$).

Table VIII-3 : Propriétés des items sélectionnés pour la tâche de dénomination écrite d'images en IRMf selon l'âge d'acquisition (précoce vs. tardif)

	Moyenne Age d'acquisition précoce (écart-type)	Moyenne Age d'acquisition tardif (écart-type)	Test T de Student
Image			
Accord image-nom de l'image (%)	96,4 (5,5)	96,3 (4,4)	n.s.
Accord nom de l'image-image (/5)	3,6 (0,5)	3,5 (0,7)	n.s.
Familiarité (/5)	2,8 (1,0)	2,3 (1,0)	n.s. (p = .053)
Complexité du dessin (/5)	3,5 (0,7)	3,6 (0,7)	n.s.
Mot-cible			
Age d'acquisition (/5)	1,8 (0,2)	2,6 (0,5)	p < .0001
Fréquence lexicale	24,0 (22,7)	19,6 (23,7)	n.s.
Nombre de lettres	5,5 (1,0)	5,9 (1,1)	n.s.
Nombre de syllabes	1,5 (0,5)	1,6 (0,5)	n.s.
Fréquence des bigrammes (token)	7619 (3127)	7268 (3381)	n.s.
Fréquence des trigrammes (token)	1143 (896)	914 (1037)	n.s.
Performances d'écriture			
Latence (ms)	937 (98)	1061 (203)	p < .002
Durée d'écriture (ms)	1857 (351)	1963 (387)	n.s.
Distance (mm)	64 (11)	70 (14)	n.s.
Vitesse moyenne (cm/s)	3,39 (0,32)	3,43 (0,32)	n.s.
Pression moyenne (u.a.)	394 (28)	399 (27)	n.s.
Durée d'essai (ms)	2841 (378)	3031 (452)	n.s.
Taux de bonnes réponses (%)	94,1 (7,5)	92,8 (6,7)	n.s.

III.2. Sélection des stimuli : tâche de dessin

Comme précédemment, les résultats de l'expérimentation préliminaire ont guidé la sélection des 35 images requises pour la tâche de dessin d'images en IRMf. N'ont été conservées parmi les 50 images testées que celles générant une durée de production inférieure à 4000 ms et un temps de réaction inférieur à 1400 ms (en moyenne), afin d'améliorer l'appariement avec la tâche de dénomination écrite eu égard à la durée d'activité motrice produite. Malgré ces précautions, une différence importante de durée de production restait manifeste entre les listes des deux tâches (1910 ms pour l'écriture contre 2894 ms pour le dessin). Ces données ayant été obtenues sans contrainte temporelle sur la durée de l'essai, il est probable que l'ajout d'une telle contrainte (la durée de chaque essai en IRM sera fixe, de 4000 ms) induise des durées de dessin plus courtes sans affecter le bon déroulement de la tâche (plusieurs participants présentaient déjà dans cette tâche préliminaire des durées de dessin moyennes sur l'ensemble des essais inférieures à 2000 ms).

La complexité visuelle moyenne du groupe d'images sélectionnées pour cette tâche en IRMf était de 1,9 (écart-type : 0,44) et le score de familiarité moyen du concept présenté sur l'image était de 3,8 (écart-type : 1,0).

III.3. Participants

16 participants adultes volontaires (8 femmes, 8 hommes), droitiers et de langue maternelle française, ont été recrutés (moyenne d'âge : $25,3 \pm 6,0$). Ils étaient en bonne santé physique, exempts de lésions cérébrales, de troubles neurologiques ou psychiatriques, de déficits visuels ou auditifs majeurs, ou de troubles de la lecture ou de l'écriture. Le niveau cognitif général était normal (score MMSE moyen : $29,7 \pm 0,5$), ainsi que le niveau en lecture (test de l'Alouette-R : indice de précision moyen : $99,0\% \pm 0,9$; indice de vitesse moyen : 488 ± 61). Le degré de latéralité manuelle établi grâce à l'échelle d'Edinburgh était de $+0,84 (\pm 0,11)$.

III.4. Critères d'exclusion et recrutement⁶

Les critères d'exclusions et d'inclusion, ainsi que les modalités de recrutement des participants étaient les mêmes que lors de la première expérimentation IRMf.

III.5. Paradigme expérimental

III.5.1. Procédure

L'examen d'IRMf était composé de 2 runs d'environ 15 min séparés par une pause et chacun composés des trois mêmes tâches présentées en alternance selon un paradigme en blocs : une tâche de dessin (reproduction d'images), une tâche de dénomination écrite d'images et une tâche d'épellation orale du nom des images (voir description des tâches ci-après). La présentation des stimuli visuels, de manière synchronisée avec l'acquisition des images fonctionnelles, était assurée grâce au logiciel Presentation® (NeuroBehavioral Systems) installé sur ordinateur portable HP EliteBook 8440p (Windows 7).

⁶ Pour cette étude, une indemnisation de 100 euros était prévue pour chaque participant provenant d'un financement de la Maison des Sciences de l'Homme de Toulouse. Le financement des passations d'IRM a été obtenu auprès de l'Institut des Sciences du Cerveau de Toulouse.

Pour chacune des 3 tâches, un bloc était composé de 5 essais d'une durée de 5000 ms chacun (i.e. durée d'acquisition de deux volumes), soit 25 secondes par bloc. Chaque bloc était répété 7 fois au cours d'un run. Chaque bloc « tâche » était suivi d'un bloc « repos » d'une durée de 20 secondes lors duquel les participants avaient simplement pour consigne d'éviter tout mouvement et de fixer une croix présentée au centre de l'écran. Un message présenté au centre de l'écran pendant 4000 ms à la fin de chaque bloc de repos rappelait le type de tâche à venir : « ECRITURE » ou « EPELLATION » ou « DESSIN ».

Quelle que soit la tâche, chaque essai se déroulait comme ceci : présentation d'une croix de fixation pour une durée de 1000 ms, immédiatement suivie de la présentation d'une image (dessin au trait) qui restait affichée à l'écran jusqu'à l'essai suivant (soit 4000 ms). Les participants avaient pour consigne d'interrompre (si nécessaire) leur production dès l'apparition de cette croix de fixation.

Le run n°1 était donc composé de 5 répétitions de la séquence suivante : « Dessin », « Repos », « Dénomination écrite - âge d'acquisition précoce », « Repos », « Epellation - âge d'acquisition tardif », « Repos ». Dans le run n°2, les listes de stimuli pour les tâches de dénomination écrite et d'épellation orales étaient simplement inversées. L'ordre des stimuli au sein des blocs était composé de manière aléatoire et plusieurs ordres différents étaient construits. Par ailleurs, la moitié des participants commençaient l'expérimentation par le run n°1 (suivi du run n°2) et l'autre moitié par le run n°2 (suivi du run n°1). La Figure VIII-4 ci-après récapitule le déroulement des différents blocs dans les deux types de runs.

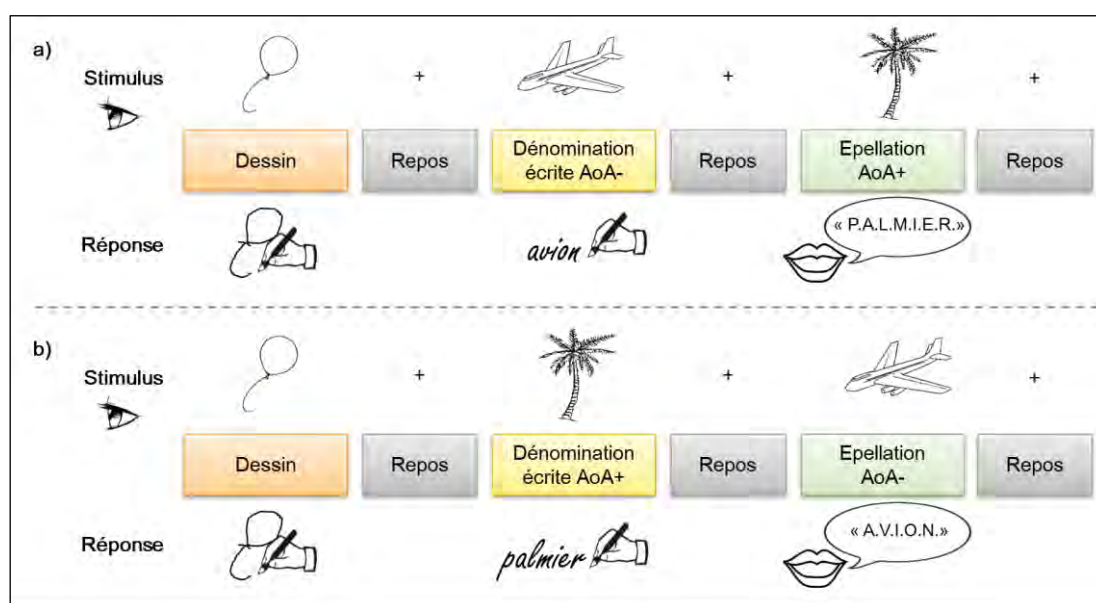


Figure VIII-4 : Schéma récapitulatif des tâches et conditions utilisées dans le run n°1 (a) et le run n°2 (b).

Avant la séance d'IRMf, une phase d'entraînement, en position allongée avec la tablette positionnée au-dessus de la taille, permettait aux participants de se familiariser avec les tâches (rythme de présentation des stimuli, écriture, dessin, épellation), avec les consignes et avec le dispositif (écriture/dessin sur la tablette sans regarder sa main, minimiser les mouvements amples, etc.).

III.5.2. Tâches

Dans la tâche de dénomination écrite, les participants devaient écrire le mot correspondant au nom de l'image présentée à l'écran le plus rapidement possible sur la tablette, tout en fixant le regard sur l'image et en minimisant les mouvements du bras et de l'avant-bras. Deux conditions étaient définies selon la liste de stimuli utilisés : « Dénomination écrite – âge d'acquisition précoce » (run n°1) et « Dénomination écrite – âge d'acquisition tardif » (run n°2). Les participants n'avaient aucun retour visuel sur leur production.

Dans la tâche d'épellation orale, les participants devaient épeler à haute voix le mot correspondant au nom de l'image présentée à l'écran, tout en fixant le regard sur l'image. Deux conditions étaient là encore définies : « Epellation – âge d'acquisition tardif » (run n°1) et « Epellation – âge d'acquisition précoce » (run n°2). Cette tâche a été utilisée puisqu'elle implique les mêmes processus cognitifs perceptifs et linguistiques d'identification du stimulus et de récupération orthographique du nom de l'image que la tâche d'écriture (jusqu'à la mémoire de travail orthographique), sans en comporter les processus cognitifs d'écriture périphériques ; allographiques et graphomoteurs.

Dans la tâche de dessin, les participants devaient reproduire grossièrement et en un minimum de traits l'image présentée à l'écran, en fixant celle-ci du regard et en minimisant les mouvements du bras et de l'avant-bras. Cette tâche a été utilisée puisqu'elle implique des processus perceptifs (i.e. dessins au trait issus de la même base d'images) et une activité graphomotrice comparable avec la tâche d'écriture (durée de la production motrice, tenue du stylo, maintien d'une pression adéquate, prise en compte des contraintes spatiales liées au dispositif, etc.) sans en inclure les processus linguistiques (lexico-sémantiques et orthographiques). Les mêmes stimuli étaient ici utilisés lors des deux runs.

III.6. Acquisition IRMf et analyse des données

III.6.1. Acquisition

Comme précédemment, l'expérience était réalisée en une session d'une heure sur une IRM Philips ACHIEVA (3 Teslas) dédiée à la recherche en neurosciences et située au Neurocampus Baudot de l'hôpital Purpan (Institut des Sciences du Cerveau de Toulouse). Une antenne tête SENSE 32 canaux était cette fois utilisée. La présentation de stimuli visuels était assurée via un vidéoprojecteur Toshiba associé à un écran translucide. Un casque audio anti-bruit MR CONFON ainsi que des bouchons d'oreille étaient utilisés en tant que protection contre le bruit de l'acquisition IRM. Une tablette graphique amagnétique (Mag Design and Engineering) était disposée de manière inclinée au-dessus de la taille des participants, leur permettant d'écrire avec le stylo fourni.

Une image anatomique 3D haute résolution était réalisée chez chaque sujet au début de la séance, constituée de 170 images pondérées en T1 (TR = 8,2 ms ; TE = 3,8 ms ; angle de bascule = 8° ; champ de vue (FOV) = 240 x 240 mm ; taille de voxel = 1 mm³). Les images fonctionnelles étaient ensuite acquises selon une séquence EPI (Echo Planar Imaging) (TR = 2500 ms ; TE = 30 ms ; angle de bascule = 90° ; champ de vue (FOV) = 224 x 236 mm). Chaque volume était composé de 44 coupes axiales de 3 mm d'épaisseur recouvrant l'ensemble du cerveau (dimensions de la coupe : 76 x 79 pixels ; taille de voxel : 2,95 x 2,95 x 3 mm). Contrairement à l'expérimentation IRMf précédente, les acquisitions étaient réalisées de manière continue.

III.6.2. Analyse des données

Toutes les images d'IRMf acquises ont été traitées au moyen du logiciel SPM12b implémenté sous la suite MATLAB. Pour chaque sujet nous disposons de 2 groupes de 370 images fonctionnelles correspondant aux volumes acquis lors des deux runs successifs. Après conversion du format natif DICOM vers le format NIfTI, les prétraitements incluaient un réalignement, une normalisation vers l'espace standard MNI (basée sur le champ de déformation issu de la segmentation de l'image structurale haute-résolution coregistrée sur l'image moyenne des images fonctionnelles), puis un lissage spatial via un noyau gaussien de 8 mm³ de FWHM.

L'analyse des données aux premier et second niveaux a été réalisée en utilisant l'approche du modèle linéaire général (GLM) (Friston et al., 1994). Les images, réalignées, normalisées et lissées de chaque participant étaient donc incluses dans un modèle comprenant

les détails du déroulement temporel de l'expérimentation (début, durée des blocs de chaque condition) et utilisant la fonction de réponse hémodynamique canonique (HRF). Les six paramètres du mouvement issus du réalignement, ainsi qu'un septième correspondant à la moyenne de l'activité dans le LCR étaient inclus dans le modèle en tant que régresseurs de non intérêt (pour prévenir les artefacts liés au mouvement du sujet). Un filtre passe-haut correspondant à 270 secondes était utilisé pour filtrer les données (i.e. suppression des fréquences inférieures à $\sim 3,7$ mHz).

Les contrastes correspondant à l'activation de chacune des 6 conditions par rapport à la ligne de base (images « bêta ») ont été créés pour chaque sujet individuellement pour être ensuite portés au second niveau dans une analyse de groupe à effets aléatoires (les tâches de dessin du run 1 et du run 2 étaient identiques mais ont été considérées comme indépendantes afin d'être en mesure de réaliser des comparaisons sur des jeux de données de tailles égales).

IV. EXPERIMENTATION IRMf 2: RESULTATS

IV.1. Données comportementales

Les latences et les durées d'écriture pour chaque essai et pour chaque participant ont été recueillies via la tablette graphique et nous ont permis de contrôler la bonne réalisation des deux tâches graphomotrices (les réponses des participants à la tâche d'épellation étaient occasionnellement contrôlées durant la séance d'IRMf mais n'étaient pas enregistrées). L'analyse de ces données comportementales avait pour objectifs d'une part de comparer les paramètres de l'activité graphomotrice pendant la tâche d'écriture par rapport à la tâche de dessin, et, d'autre part, de confirmer un effet de l'âge d'acquisition des mots produits au sein de la tâche d'écriture.

IV.1.1. Comparaison « Écriture dictée vs. dessin »

Des analyses utilisant un modèle linéaire mixte ont été conduites avec le type de Tâche en tant qu'effet fixe (« Dénomination écrite » vs. « Dessin ») et les facteurs Sujet et Item en tant qu'effets aléatoires. Les essais manqués ou invalides étaient exclus (représentant 6% des données).

Deux analyses ont été conduites en utilisant ces facteurs : sur les latences puis sur les durées de production (après suppression des valeurs extrêmes). Les *outliers* (résidus du modèle

supérieurs à 2,5 écart-types) étaient supprimés dans un second temps (2,6% pour les latences et 1,1% pour les durées).

Les résultats ne montraient pas de différence significative entre les latences en dénomination écrite (1176 msec) et en dessin (1183 msec) ($F(1, 96) = 0,13$; $p = .72$) mais une tendance à la significativité sur les durées (dénomination écrite = 2204 ms ; dessin = 2306 ms ; $F(1, 98) = 3,46$; $p = .07$).

IV.1.2. Comparaison « Dénomination écrite – âge d'acquisition précoce vs. Dénomination écrite – âge d'acquisition tardif »

Une seconde d'analyses a été conduite sur les latences et les durées de la tâche de dénomination écrite uniquement en utilisant cette fois le facteur « Age d'acquisition » (« Précoce » vs. « Tardif ») en tant qu'effet fixe et les facteurs Sujet et Item en tant qu'effets aléatoires. La suppression des valeurs extrêmes puis des *outliers* du modèle ont conduit à la suppression de 1,6% (puis 2,9%) des latences et 1,6% (puis 2,4%) des durées.

Ni l'analyse des latences, ni l'analyse des durées n'ont révélé de différences significatives : latence moyenne de 1172 ms pour la condition « précoce » contre 1192 ms pour la condition « tardif » ($F(1, 67) = 0,70$; $p = .40$), durée moyenne de 2302 ms pour la condition « précoce » contre 2318 ms pour la condition « tardif » ($F(1, 68) = 0,05$; $p = .82$).

Les latences et les durées de production dans les deux tâches et dans les deux conditions de la tâche de dénomination écrite sont rapportées dans les graphiques de la Figure VIII-5 ci-après.

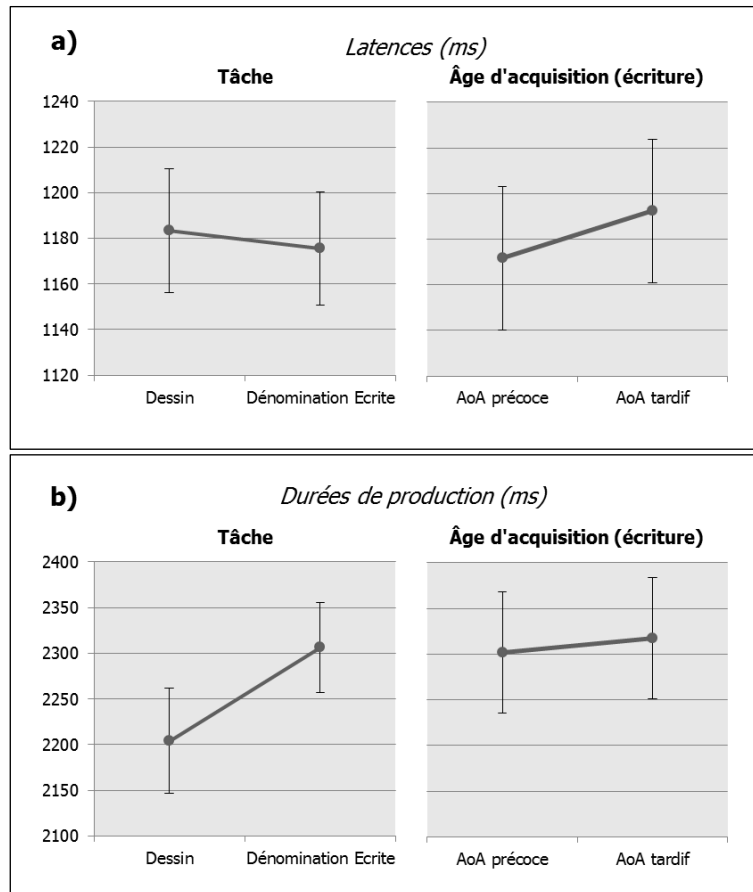


Figure VIII-5 : Latences (a) et durées de productions (b) moyennes (ms) selon le type de tâche puis selon l'âge d'acquisition en dénomination écrite

IV.2. Données de neuroimagerie

Dans un premier temps (i.e. analyses principales), plusieurs contrastes de second niveau ont été réalisées, visant à identifier les structures cérébrales impliquées dans la tâche de dénomination écrite par comparaison à la ligne de base et par rapport aux deux tâches contrôles de dessin puis de d'épellation orale. Plusieurs contrastes secondaires ont été réalisés dans un second temps (i.e. analyses additionnelles) visant à identifier les aires cérébrales spécifiques du traitement linguistique des images, puis visant à identifier les aires sensibles à l'âge d'acquisition des mots écrits.

Sauf exception signalée, tous les résultats d'activation présentés ci-après sont significatifs au seuil statistique de $p < .05$ avec correction FWE (taille minimum de cluster $k = 20$ voxels). La localisation des aires concernées par les activations était permise grâce à la toolbox xjView 8 pour SPM (Cui, Li, & Song, 2011). Les cartes statistiques de groupe étaient superposées sur un modèle 3D standardisé pour leur visualisation via le logiciel MRICron (Rorden & Brett, 2000). Les tables des résultats d'activation qui ne sont pas présentés ci-après sont disponibles Annexe 6.2.

IV.2.1. Analyses principales

IV.2.1.1. Dénomination écrite vs. Ligne de base

Le réseau principal de la dénomination écrite, tel que mis en évidence par le contraste « Dénomination écrite (âge d'acquisition précoce & tardif) vs. Ligne de base » (voir Table VIII-4 et Figure VIII-6) était notamment composé d'un large cluster fronto-pariétal gauche incluant des pics dans le cortex moteur et sensori-moteur primaire (sillon central), les lobules pariétal supérieur et inférieur, l'aire motrice supplémentaire, le gyrus frontal inférieur (et prémoteur ventral) et le gyrus supramarginal. Ce contraste révèle de plus des clusters d'activations dans le cervelet / cortex occipital droit (incluant le cervelet antérieur et postérieur, le gyrus occipital moyen et inférieur, le gyrus lingual et le gyrus temporal inférieur) et gauche (incluant le cervelet postérieur, le gyrus occipital moyen et inférieur, le gyrus fusiforme et le gyrus temporal inférieur), puis dans le gyrus frontal inférieur droit, le gyrus supramarginal droit et le gyrus frontal supérieur droit.

Table VIII-4 : Activations significatives pour l'analyse de groupe du contraste « Dénomination écrite > Ligne de base »

	Localisation	Taille de cluster	Valeur de T	Z-score	Coordonnées MNI		
					x	y	z
Gauche	Gyrus précentral (BA 3/4)	2296	20,23	Inf	-36	-21	66
	Gyrus précentral (BA 3/4)		19,70	Inf	-33	-24	54
	Gyrus précentral (BA 3/4)		18,56	Inf	-42	-15	54
	Gyrus postcentral (BA 5)		12,78	Inf	-39	-45	63
	Aire motrice supplémentaire		11,68	Inf	-3	-3	60
	Gyrus précentral (BA 6)		11,05	Inf	-57	3	36
	Lobule pariétal supérieur		10,89	Inf	-33	-54	60
	Gyrus frontal inférieur (pars opercularis)		8,59	7,32	-57	9	24
	Gyrus supramarginal		6,14	5,60	-57	-21	24
Droit	Cervelet antérieur (culmen)	2048	17,28	Inf	27	-48	-27
	Cervelet antérieur (vermis)		16,88	Inf	6	-60	-12
	Cervelet antérieur (culmen)		15,52	Inf	12	-54	-18
Gauche	Cervelet postérieur (declive)	663	10,65	Inf	-30	-63	-21
	Gyrus occipital moyen (BA 18)		8,74	7,42	-27	-99	3
	Gyrus temporal inférieur / Gyrus occipital moyen		7,39	6,51	-45	-63	-9
Droit	Gyrus frontal inférieur / Gyrus précentral (BA 9)	32	6,98	6,22	60	9	36
Droit	Gyrus supramarginal	42	6,53	5,89	36	-36	39
Droit	Gyrus frontal supérieur	35	6,35	5,76	30	-6	60

Les valeurs des pics présentés en gris clair sont issus d'une analyse complémentaire restreinte au cluster principal (k = 2296 voxels).

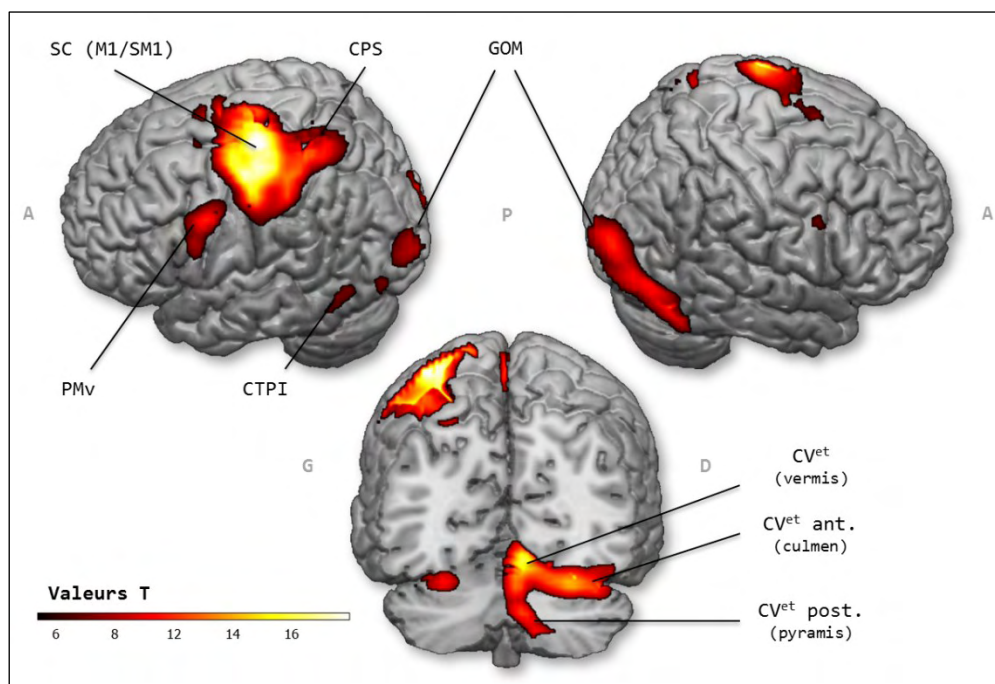


Figure VIII-6 : Activations cérébrales pour le contraste « Dénomination écrite > Repos » (seuil $p < .05$ FWE, $k > 20$). Vues sagittales droite et gauche (en haut) et coupe coronale en vue postérieure-dorsale (en bas). SC, sillon central ; CPS, cortex pariétal supérieur ; GOM, gyrus occipital moyen ; PMv, cortex prémoteur ventral ; CTPI, cortex temporal postérieur inférieur ; CV^{et}, cervelet.

IV.2.1.2. Dénomination écrite vs. Dessin

Le contraste « Dénomination écrite (âge d'acquisition précoce & tardif) vs. Dessin (runs 1 & 2) » (voir Figure VIII-7), conçu pour identifier les aires actives lors de l'écriture par rapport à une tâche non linguistique, a révélé des activations dans le précuneus et le cuneus, les gyrus temporal moyen et supérieur bilatéraux, le gyrus angulaire bilatéral et le cortex occipital droit (gyrus lingual et calcarine).

Le contraste inverse « Dessin vs. Dénomination écrite » a révélé un réseau bilatéral symétrique composé d'activations dans le cortex occipito-temporal (gyrus temporal inférieur, fusiforme, occipital moyen, occipital inférieur), le cortex pariétal supérieur et inférieur (BA 7, BA 40), le gyrus supramarginal, le gyrus occipital supérieur et moyen, le gyrus frontal supérieur (à la jonction avec le gyrus précentral), le cervelet antérieur ainsi que le gyrus frontal inférieur droit (pars opercularis) (voir Figure VIII-7).

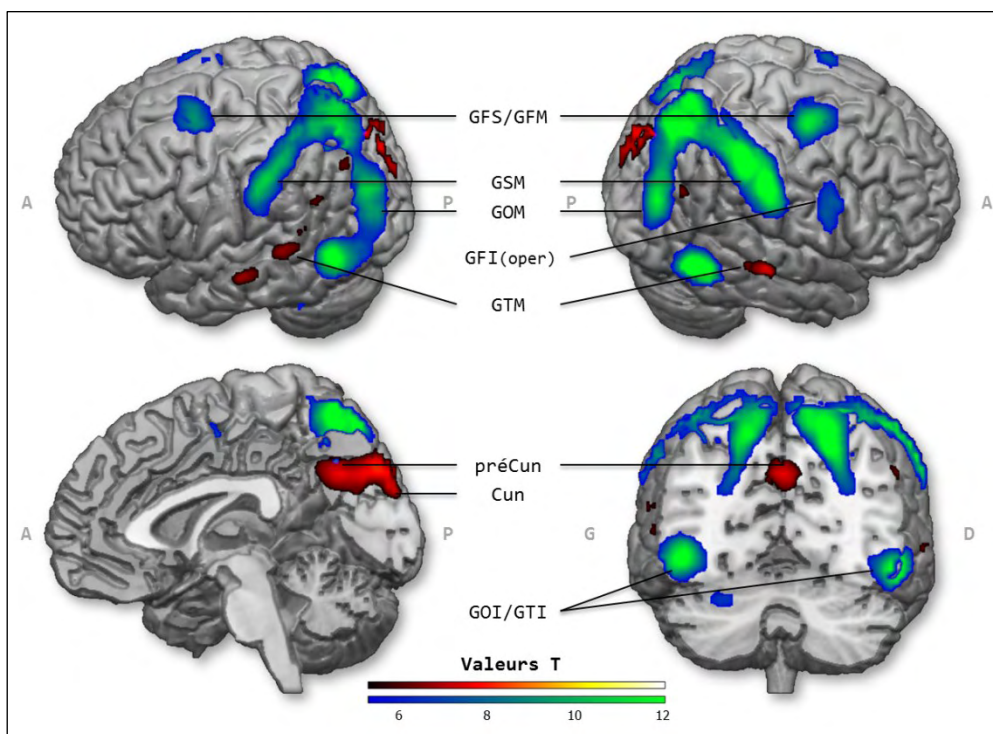


Figure VIII-7 : Activations cérébrales pour les contrastes « Dénomination écrite vs. Dessin » (rouge-jaune) » et « Dessin vs. Dénomination écrite » (bleu-vert) (seuil $p < .05$ FWE, $k > 20$). Vues sagittales gauche et droite (en haut), et coupes sagittale et coronale (en bas). GFS, gyrus frontal supérieur ; GFM, gyrus frontal moyen ; GSM, gyrus supramarginal ; GOM, gyrus occipital moyen ; GFI (oper), pars opercularis du gyrus frontal inférieur ; GTM, gyrus temporal moyen ; préCun, précuneus ; Cun, cuneus ; GOI, gyrus occipital moyen ; GTI, gyrus temporal inférieur.

IV.2.1.3. Dénomination écrite vs. Epellation orale

Le réseau d'aires présentant une augmentation du signal BOLD en « Dénomination écrite » (âge d'acquisition précoce & tardif) par rapport à la tâche d'« Epellation orale » des mêmes mots (âge d'acquisition précoce & tardif), et supposé refléter essentiellement les processus périphériques/moteurs de l'écriture, était composé d'un cluster fronto-pariétal supérieur gauche (aire motrice et sensorimotrice primaire, gyrus précentral et postcentral, lobule pariétal supérieur et inférieur), de deux clusters cérébelleux droits (antérieur et postérieur), puis de clusters dans le cortex cingulaire antérieur / orbital médial (bilatéral) et le thalamus (voir Table VIII-5).

Table VIII-5 : Activations significatives pour l'analyse de groupe du contraste « Dénomination écrite > Epellation orale »

	Localisation	Taille de cluster	Valeur T	Z - score	Coordonnées MNI		
					x	y	z
Gauche	Gyrus précentral (BA 3/4)	1089	14,45	Inf	-36	-24	51
	Gyrus précentral (BA 6)		13,23	Inf	-33	-21	66
	Gyrus postcentral (BA 5)		9,96	Inf	-39	-45	63
Droit	Cervelet antérieur (culmen)	271	11,85	Inf	15	-54	-21
	Cervelet antérieur (culmen)		11,30	Inf	6	-60	-12
Gauche	Gyrus frontal médial (aire motrice supplémentaire)	57	7,32	6,34	-3	-9	54
Droit	Cortex cingulaire antérieur	226	7,29	6,32	9	33	-6
	Gyrus frontal médial		7,17	6,24	9	45	-15
	Gyrus frontal médial		7,06	6,16	18	33	-12
Droit	Cervelet postérieur (uvula)	62	7,29	6,32	6	-69	-36
	Cervelet postérieur		6,67	5,89	12	-63	-48
Gauche	Thalamus (pulvinar)	31	6,94	6,08	-15	-27	6

IV.2.2. Analyses additionnelles

IV.2.2.1. Aires du traitement linguistique des items : conjonction

Afin d'identifier les aires reflétant les processus lexicaux, de récupération et de programmation orthographique (récupération de la représentation orthographique de l'item présenté et stockage temporaire dans le buffer graphémique en vue de la production) indépendamment de la sortie motrice (graphomotrice ou orale), une analyse de conjonction entre les contrastes « Dénomination écrite » et « Epellation orale » a été réalisée. Dans un second temps, pour s'affranchir des aires relevant de l'entrée visuelle et de l'accès sémantique (analyse des traits / reconnaissance visuelle de l'image), un masque exclusif du contraste « Dessin vs. ligne de base » a été appliqué sur les résultats de cette conjonction (masque au seuil non corrigé de $p < .001$).

L'analyse de conjonction (voir Figure VIII-8 a)) a mis en évidence des activations dans le cervelet postérieur bilatéral, le gyrus occipital moyen bilatéral (BA 18 et 19), l'aire motrice supplémentaire et au niveau du sillon central inférieur (gyrus précentral et postcentral, BA 6, incluant des voxels dans la pars opercularis du gyrus frontal inférieur). En appliquant le masque exclusif, seuls 2 clusters demeurent actifs (voir Figure VIII-8 b)): gyrus précentral/postcentral et cortex occipital (gyrus occipital moyen / cuneus, BA 17/18).

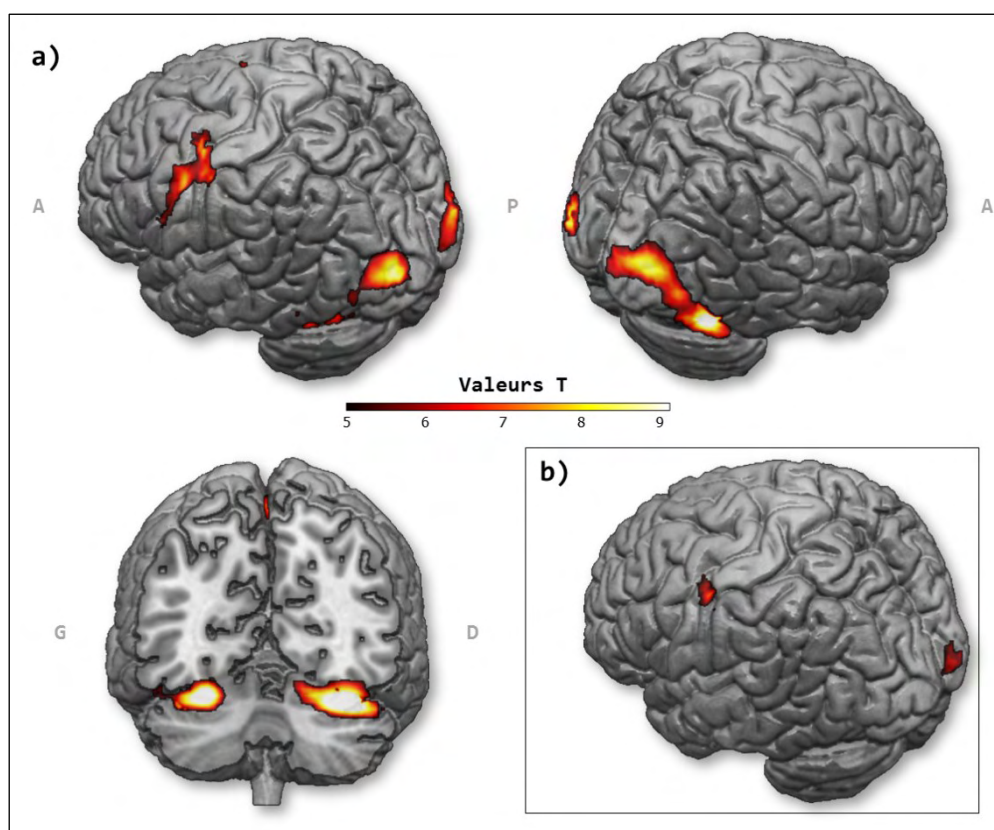


Figure VIII-8 : a) Activations cérébrales pour la conjonction « Dénomination écrite » et « Epellation orale » ($p < 0.05$ avec correction FWE, $k > 20$). Vues sagittales gauche et droite. b) Activations résultant de la même analyse après application du masque exclusif « Dessin ».

IV.2.2.2. Effet de l'âge d'acquisition des mots produits

L'identification des aires sensibles à l'âge d'acquisition des mots écrits ou épelés a nécessité la réalisation de 6 contrastes : « précoce vs. tardif » et « tardif vs. précoce » indépendamment de la tâche (écriture ou épellation), puis en épellation orale uniquement et enfin en dénomination écrite uniquement.

Aucun cluster significatif n'a été révélé dans ces analyses au seuil de $p < .05$ avec correction FWE ($k > 20$). Au seuil moins conservateur de $p < .001$ sans correction ($k > 20$), 3 de ces contrastes mettaient en évidence plusieurs clusters significatifs :

- La comparaison « précoce vs. tardif » indépendamment de la tâche a révélé un cluster d'activation au niveau du sillon central droit (gyrus précentral / postcentral). Ce cluster ne faisait pas du réseau activé lors de l'analyse de conjonction « Ecriture et Epellation » (tel que mis en évidence via l'utilisation d'un masque).

- La comparaison « précoce vs. tardif » ($p < .001$ sans correction, $k > 20$) en épellation orale a révélé deux clusters (37 et 20 voxels) au niveau frontal médial et orbitaire. La même analyse conduite en utilisant le masque inclusif « Epellation orale vs. Ligne de base » n'a là encore révélé aucun cluster actif, suggérant que ces activations n'appartenaient pas à au réseau de l'épellation orale proprement dit.
- La comparaison « tardif vs. précoce » en dénomination écrite ($p < .001$ sans correction, $k > 20$) a révélé des activations dans le cortex orbitofrontal médial (1 cluster, 30 voxels) et le précuneus/cuneus (2 clusters, 78 voxels, incluant des voxels dans le cortex cingulaire postérieur). Comme précédemment, aucune activation ne persistait au même seuil en utilisant le masque inclusif « Dénomination écrite vs. Ligne de base ».

IV.2.3. Analyse complémentaire : activations de la GMFA

Nous avons constaté lors de la comparaison de la tâche de dénomination écrite avec la tâche de dessin la présence de l'activation d'une aire prémotrice supérieure bilatérale (quoiqu'avec une prédominance droite), semblant correspondre à la GMFA. Cela a motivé la réalisation d'une analyse complémentaire.

Nous avons extrait l'estimation de signal de chaque tâche dans deux volumes d'intérêt (VOI) issus des résultats de notre méta-analyse : la GMFA « gauche » et la GMFA « droite » (sphères de 5 mm de diamètre centrées sur les coordonnées du pic) (voir Figure VIII-9). Les VOI étaient construites en utilisant la toolbox MarsBar 0.43 pour SPM (Brett, Anton, Valabregue, & Poline, 2002) et les données extraites en utilisant la toolbox REX pour Matlab.

Des tests T ont révélé que ces deux régions étaient davantage activées dans la tâche de dessin par rapport à la tâche d'écriture ($T(62) = 3,34$; $p < .001$ et $T(62) = 6,00$; $p < .0001$). Les activations de ces régions pendant la tâche d'épellation apparaissaient quant à elles quasiment nulles. Cette analyse a aussi révélé qu'alors que la tâche de dessin était caractérisée par une balance interhémisphérique relativement équilibrée ($T(62) = 1,98$; $p = .06$), la latéralisation en faveur de l'hémisphère gauche était très marquée pour la tâche d'écriture ($T(62) = 6,68$; $p < .0001$; voir Figure VIII-9)

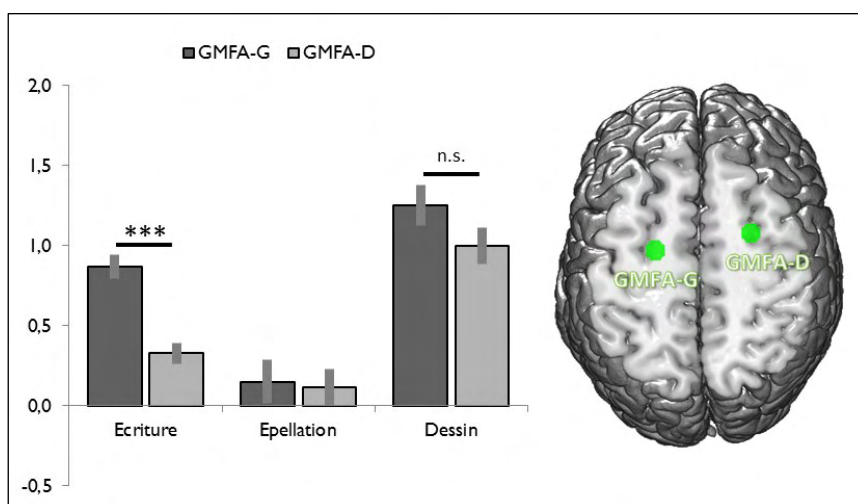


Figure VIII-9 : Estimation de la variation de signal BOLD selon le type de tâche dans la GMFA gauche et sa contrepartie droite (unités arbitraires). *** : $p < .0001$.

Synthèse des résultats

Réseau cérébral de la dénomination écrite

- Les principales régions du réseau cortical de l'écriture étaient retrouvées activées (M1/SM1, AMS, CV^{et} droit, PMv gauche, LPS et LPI gauche), ainsi que le cortex occipital (visuel) bilatéral.
- Seules les régions du cuneus/précuneus et du cortex temporal moyen semblaient plus activées dans l'écriture que dans la tâche de dessin. Celle-ci, comparativement à l'écriture, entraînait des activations prémotrices, pariétales supérieures, pariétales inférieures, et occipito-temporales bilatérales.
- Par rapport à la tâche d'épellation orale, la tâche d'écriture impliquait des activations fronto-pariétales, centrées sur le cortex moteur primaire, ainsi que du cervelet droit et du cortex orbitofrontal. Les activations communes entre ces deux tâches convergeaient au niveau du cortex prémoteur, du cervelet bilatéral, et du cortex occipital bilatéral

Effet de l'âge d'acquisition des mots

- En utilisant des masques exclusifs, nous avons observé qu'aucune aire du réseau cérébral de l'écriture ou du réseau cérébral de l'épellation orale n'apparaissait sensible à l'âge d'acquisition des mots produits. Au-delà de ces réseaux, des activations significatives étaient observées dans le gyrus précentral droit (les deux tâches), le cortex orbitofrontal et le cuneus (écriture) ou le cortex orbitofrontal médial (épellation).

V. DISCUSSION

Lors de cette expérimentation en IRMf, nous souhaitions étudier le réseau cérébral de l'écriture manuscrite dans une tâche de dénomination écrite d'images. Deux tâches supplémentaires avaient pour but de dissocier un réseau correspondant aux processus cognitifs

linguistiques centraux de l'écriture (comparaison avec le dessin), d'un réseau correspondant aux processus moteurs/périphériques (comparaison avec l'épellation orale). Nous pouvons tout d'abord constater que les aires mises en jeu dans cette tâche de dénomination écrite étaient très semblables à celles mises en évidence lors de l'expérimentation précédente en écriture sous dictée : réseau essentiellement gauche, comprenant un large cluster centré sur le cortex moteur primaire et s'étendant dans le cortex pariétal supérieur et inférieur, frontal supérieur et l'aire motrice supplémentaire, ainsi que des activations du cortex prémoteur ventral (et frontal inférieur) gauche, du cervelet droit, du cortex temporal postérieur inférieur gauche et de manière plus marginale au niveau frontal et pariétal droit. Cette tâche se distingue de la précédente par des activations occipitales bilatérales, résultant de l'entrée visuelle. Aucune activation sous-corticale n'était par contre identifiée (une activation du thalamus émergeait cependant lors du contraste impliquant la tâche orale).

V.1. Ecriture de mots vs. Dessin d'images

La tâche de dessin utilisée était conçue comme une tâche équivalente à la tâche d'écriture sur de nombreux points : même entrée visuelle et production d'un tracé graphique complexe avec le stylo (impliquant une planification motrice et un guidage visuo-spatial des mouvements) ; la distinction se situait principalement au niveau orthographique (récupération de la forme orthographique du mot, des représentations des lettres). Au niveau comportemental, nous pouvons considérer que les durées de préparation et d'exécution étaient globalement équivalentes entre ces deux types de tâches, bien que la durée de production semblait légèrement plus longue lors de l'écriture des mots. En réalité, nous avons observé qu'aucune des aires du réseau de la dénomination écrite évoqué précédemment n'apparaissaient davantage activées dans la tâche d'écriture par rapport à la tâche de dessin (ce qui a par ailleurs été vérifié en réalisant le contraste « Ecriture vs. Dessin » avec un masque inclusif « Ecriture vs. ligne de base »). Ces activations étaient situées le long du sillon temporal moyen (principalement gauche), jusqu'au gyrus angulaire, et dans un vaste cluster central englobant le cuneus et le précuneus. Nous pouvons proposer que celles-ci correspondent en réalité à des « désactivations » d'amplitude différente dans le réseau cérébral du repos ou réseau par défaut (*default-mode network* ; Fox et al., 2005; Raichle et al., 2001). En effet, ce réseau est composé de régions qui ont tendance à être activées de manière synchronisée en état de repos ou plutôt désactivées lors de la réalisation d'une tâche, d'autant plus que celle-ci est coûteuse en ressources attentionnelles (Gusnard & Raichle, 2001). L'examen des valeurs des coefficients bêta des activations du cuneus dans les deux tâches motrices, toutes deux négatives, renforce cette

hypothèse, qui signifierait que la tâche de dessin était simplement plus coûteuse que la tâche d'écriture. Ceci est en effet tout à fait probable, l'écriture étant une tâche très automatisée.

Le réseau issu du contraste inverse, mettant en évidence les régions davantage activées dans la tâche de dessin par rapport à la tâche d'écriture, était beaucoup plus significatif et impliquait en particulier plusieurs régions bilatérales pariétales supérieures et inférieures. On peut supposer que celles-ci reflètent un plus haut degré d'imagerie visuo-spatiale de la tâche de dessin, puisque des activations très similaires ont été rapportées lors du dessin « imaginé » (Harrington et al., 2007; Suchan et al., 2002). De la même manière, les activations occipito-temporales inférieures bilatérales que l'on rapporte ont été observées par Makuuchi et al. (2003) lors d'une tâche de dessin en IRMf et attribuées à une voie ventrale dédiée à la reconnaissance de la forme des objets et l'identification de leurs différentes parties en vue du dessin. Une des différences que l'on peut aussi noter par rapport à ce travail est que l'activation qu'ils rapportent dans le cortex prémoteur ventral était bilatérale alors qu'elle était restreinte à l'hémisphère droit dans notre contraste. Cela suggère que le cortex prémoteur ventral gauche était autant activé dans l'écriture que dans le dessin.

Nous avons constaté qu'une région prémotrice supérieure bilatérale apparaissait distinctement davantage activée lors de la tâche de dessin par rapport à la tâche d'écriture, ce qui a motivé la réalisation d'une analyse complémentaire utilisant les coordonnées de la GMFA telles que nous les avons rapportées dans notre méta-analyse. Nous pouvons donc confirmer l'activation d'une « GMFA bilatérale » dans le dessin, ce qui semble ainsi plaider en faveur d'un rôle très périphérique de cette région dans l'écriture : aucun processus spécifique de l'écrit, de récupération des formes des lettres, et de transposition en commandes motrices, n'était requis dans cette tâche. Le fait que cette aire que l'on sait cruciale pour l'écriture soit aussi activée lors d'une tâche telle que le dessin n'a en réalité rien d'étonnant. L'écriture est une invention trop récente pour que l'évolution ait permis le développement de circuits cérébraux qui lui soient uniquement propres. Il est tout à fait naturel que de mêmes régions prémotrices soient recrutées lors de ces tâches manuelles graphiques assez similaires. En fait, plutôt qu'une modulation de l'intensité d'activation (le fait qu'elle soit supérieure lors du dessin peut résulter de différences au niveau du geste moteur effectué), il semble que la nature linguistique de la tâche d'écriture se manifeste par une latéralisation plus importante à l'hémisphère gauche de cette aire, ce qui est mis en évidence par notre analyse (cf. Figure VIII-9). Il est ainsi probable qu'au fur et à mesure de l'apprentissage, certaines populations neuronales au sein de cette aire prémotrice de l'hémisphère gauche (probablement par une « communication » accrue avec les aires langagières gauches) finissent par se spécialiser pour l'écriture (la production des graphèmes), d'où les symptômes agraphiques majeurs qui découlent de sa lésion. On peut ainsi

lui postuler un rôle général d'interface entre les représentations internes des mouvements et les commandes motrices qui leur correspondent. Un rôle visuo-attentionnel n'est pas non plus à exclure, du fait de son caractère bilatéral (pour une tâche réalisée avec la main droite uniquement) et de sa grande proximité avec les champs oculomoteurs frontaux.

V.2. Aires dédiées aux processus centraux en écriture et en épellation

L'analyse de conjonction entre les tâches d'épellation et d'écriture avait pour but d'isoler les processus mis en jeu dans la récupération de la représentation orthographique d'un mot à partir d'une image indépendamment de la nature de la sortie. On y en effet retrouve des régions vraisemblablement impliquées dans le traitement de l'entrée visuelle, telles que le cortex occipital, mais aussi d'autres régions plutôt généralement associée à une sortie motrice : sillon central, aire motrice supplémentaire et cervelet. L'utilisation du masque exclusif « Dessin » suggère en effet que celles-ci étaient pour une bonne part aussi impliquée dans la tâche motrice de dessin (bien qu'il ne faille pas négliger qu'une composante sémantique soit bien entendu présente dans une telle tâche). Ainsi la principale zone de convergence entre l'écriture et l'épellation semblait se situer dans la partie moyenne du sillon central, incluant des voxels à la fois dans le gyrus précentral et le gyrus postcentral. De même que l'aire plus ventrale dont nous avons plusieurs fois montré l'implication dans l'écriture, cette région a été associée à certains traitements phonologiques dans le langage. L'importante méta-analyse de Vigneau et al. (2006) a en effet décrit cette région prémotrice, aussi impliquée dans l'articulation vocale, comme faisant partie d'un réseau de coordination entre phonologie et motricité dans la parole. Nous avons déjà évoqué l'hypothèse qu'il puisse en être de même dans l'écriture, notamment suite au travail de Omura et al. (2004) identifiant le cortex prémoteur ventral comme siège du processus de conversion phonème-graphème. Un recouvrement surviendrait au niveau de cette aire que nous observons, donc entre traitements phono-orthographiques à destination du geste manuel (écriture) et articuloire (épellation orale). Une diminution du seuil statistique de cette conjonction ($p < .001$, sans correction, non présentée ici) permettait de plus d'entrevoir que cette zone d'activation commune englobait l'essentiel de la partie inférieure du cortex prémoteur, incluant le cortex frontal inférieur postérieur (par opercularis).

Un des principaux processus cognitifs que les tâches d'écriture et d'épellation ont aussi en commun est le stockage temporaire de la représentation orthographique, pendant son transcodage en schèmes moteurs et représentations allographiques (écriture) ou en représentations du nom des lettres. Une des principales hypothèses que nous proposons quant au rôle fonctionnel de la GMFA était justement son implication dans le buffer graphémique. Cette

hypothèse n'est donc pas vérifiée puisque, comme on peut le constater sur la Figure VIII-9, on ne constate aucune activation significative de la GMFA pendant la tâche d'épellation. Ce résultat tendrait à montrer que la fonction remplie par cette aire, sensible à la longueur orthographique des mots selon Rapp et Dufor (2011), interviendrait uniquement lorsque des commandes motrices manuelles sont requises. Cela situerait donc plutôt le rôle de la GMFA en aval du buffer graphémique, probablement au niveau de la récupération des schèmes moteurs correspondant aux différents graphèmes à produire (c'est en effet ce rôle d'interface qui avait été postulé initialement), ou du stockage temporaire de ces représentations motrices pendant leur exécution (le "buffer moteur" ; Van Galen, Smyth, Meulenbroek, & Hylkema, 1989). Il reste ainsi à démontrer que le processus de buffer graphémique présent dans les modèles cognitifs de production orthographique puisse se matérialiser par un siège anatomique commun lors de l'écriture et de l'épellation, en étudiant par exemple des effets de longueur orthographique dans ces deux tâches.

Contrairement à nos attentes, cette analyse de conjonction n'a donc pas permis d'isoler d'aires temporales et pariétales pourtant traditionnellement associées à la récupération des formes orthographiques telles que le gyrus angulaire gauche ou le cortex temporal postérieur inférieur gauche (gyrus fusiforme). Il semble en réalité se confirmer que le gyrus angulaire, bien qu'associé à certaines formes de dyslexies ou de dysgraphies n'est généralement pas rapporté activé lors de tâches d'écriture en neuroimagerie (e.g. Beeson et al., 2003) (voir aussi les résultats de notre méta-analyse ou celle de Purcell et al., 2011b). Cela pourrait résulter d'une fonction du gyrus angulaire de plus haut niveau, dans la récupération des concepts (Brownsett & Wise, 2010), fonction qui n'est pas suffisamment sollicitée dans des tâches simple d'écriture de mots isolés.

L'activation plutôt marginale du cortex temporal postérieur inférieur (seuls quelques voxels étaient présent dans le gyrus fusiforme, au sein du cluster occipital-cérébelleux gauche) est plus étonnante. C'est en réalité la tâche de dessin qui a généré les activations temporo-occipitales les plus importantes, mais de manière bilatérale. De telles activations lors du dessin ont déjà été rapportées (Harrington et al., 2007; Makuuchi et al., 2003), et attribuées à la voie visuelle ventrale de reconnaissance des objets. Lors de notre première expérimentation en IRMf, les activations du gyrus fusiforme gauche dans l'écriture n'émergeaient que lors de la comparaison avec la tâche de dessin de créneaux. On peut supposer que la tâche de dessin utilisée ici sollicitait bien davantage cette voie visuelle ventrale, d'où notre difficulté à faire émerger une spécialisation pour les formes orthographiques au sein de cette région.

Un autre résultat inattendu de cette analyse de conjonction est l'activation bilatérale du cervelet. On observe en fait qu'une région bilatérale du cervelet postérieur (lobule VI) était

activée sur l'ensemble des trois tâches (une autre région plus antérieure, de la portion gauche du vermis était activée dans les deux tâches manuelles). Le cervelet ayant été décrit comme impliqué dans de nombreuses fonctions, motrices, mais aussi langagières et exécutives (Ohyama et al., 2003; Stoodley & Schmahmann, 2009), il est difficile de conclure. Les trois tâches impliquaient toutes un traitement sémantique de l'image présentée et une production motrice mais le caractère bilatéral de cette activité nous semble peu compatible avec un rôle purement linguistique ou purement moteur manuel. Une fonction générale dédiée à la capacité à automatiser une tâche ; un déficit des fonctions du cervelet a pu être proposé comme à la base de plusieurs troubles développementaux de type dyslexiques, dysgraphiques ou dyspraxiques (Nicolson & Fawcett, 2011; Nicolson, Fawcett, & Dean, 2001), pourrait expliquer une telle conjonction d'activation. L'implication du cervelet est souvent négligée dans les études d'imagerie de l'écriture et davantage de travaux sont requis pour préciser son rôle fonctionnel.

V.3. Effets de l'âge d'acquisition

Enfin, nous espérons dans ce travail identifier les aires sensibles à l'âge d'acquisition des mots écrits, traduisant par exemple une plus forte implication de la récupération de la forme orthographique lexicale des mots lorsque ceux-ci étaient acquis précocement (se manifestant au niveau comportemental par un temps de réaction plus court, comme nous l'avons mis en évidence lors de notre expérimentation préliminaire). Rapp et Dufor (2011) ont rapporté qu'au sein du réseau de l'écriture sous dictée (par rapport au traçage de cercles), plusieurs aires étaient davantage activées lors de l'écriture de mots rares : la jonction frontale inférieure (correspondant au cortex prémoteur ventral), le thalamus, le putamen et le cortex cingulaire antérieur. Une région d'intérêt correspondant au gyrus fusiforme activé dans l'écriture démontrait aussi un effet de fréquence significatif. Nous n'avons pas reproduit un tel résultat avec l'âge d'acquisition puisqu'au seuil statistique utilisé, aucune des régions activées lors de l'écriture ou de l'épellation orale (i.e. contrastes avec la ligne de base utilisés en tant que masques inclusifs) ne démontrait une telle sensibilité. Quelques petites aires sensibles à l'âge d'acquisition des mots produits étaient cependant identifiées (i.e. cortex orbitofrontal, précuneus, gyrus précentral droit) mais celles-ci étant situées hors des réseaux spécifiques de chaque tâche, on ne peut leur attribuer le rôle orthographique recherché. Cette absence de résultats peut avoir plusieurs explications. La différence entre mots acquis précocement et tardivement n'était peut-être pas assez importante pour impliquer le recrutement de circuits cérébraux suffisamment dissociés pour être mis en évidence au sein d'un seul groupe de sujets. Nous avons contrôlé la fréquence lexicale des mots, qui était donc identique dans les deux

catégories, pour être en mesure de faire la distinction entre effets de fréquence et effets d'âge d'acquisition (qui a été mise en évidence au niveau comportemental ; Bonin et al., 2002). Cela a eu naturellement pour effet de réduire l'écart entre nos mots appris précocement ou tardivement. L'effet comportemental sur les latences n'était en effet plus significatif (alors que c'était le cas sur les données acquises hors IRM). En outre, l'utilisation d'un paradigme en blocs, si elle permet généralement d'obtenir des activations avec une puissance statistique plus importante peut générer des phénomènes d'habituation et une anticipation du participant. Cela a pu avoir pour effet une réduction de la sensibilité à de faibles variations d'activité cérébrales d'ordre « cognitive » (ou linguistique) par comparaison aux activations motrices, nécessairement soutenues pendant la réalisation des tâches. Nous avons en effet vu qu'il était difficile d'identifier des aires sous-tendant les processus orthographiques au travers de nos différentes tâches alors que les activations motrices étaient facilement identifiables.

V.4. Conclusion

Bien que cette étude n'ait pas permis de répondre à toutes les questions que nous nous posions concernant les substrats cérébraux des processus orthographiques à l'œuvre dans l'écriture, le réseau essentiellement fronto-pariétal gauche de l'écriture manuscrite tel que décrit dans la méta-analyse ou lors de l'expérimentation d'écriture sous dictée en IRMf était bel et bien activé dans la tâche de dénomination écrite d'images. Ces données obtenues chez chacun de nos participants pourront ainsi être exploitées dans l'expérimentation ultérieure visant à stimuler les aires de l'écriture par rTMS. Nous avons par ailleurs montré que les résultats de neuroimagerie de l'écriture pouvaient être grandement influencés par le degré de complexité ou d'engagement attentionnel requis par la tâche contrôle motrice. Quand une tâche de *finger tapping* contrôlera tout au plus une activité motrice manuelle non spécifique (e.g. aire M1), une tâche de dessin peut être utilisée pour contrôler la majorité des processus périphériques de l'écriture (ces deux tâches partageant vraisemblablement un réseau commun, bien que latéralisé différemment). Il serait cependant probablement plus efficace d'utiliser cette tâche de dessin chez des individus pour lesquels elle est autant automatisée que peut l'être l'écriture. La tâche d'épellation n'a pas permis de conclure quant aux aires cérébrales sous-tendant les processus centraux d'écriture, nous estimons pourtant qu'une telle tâche est une des seules à même d'isoler des processus comme le buffer graphémique, lors de la comparaison avec l'écriture, puisqu'il s'agit, comme l'écriture manuscrite ou l'écriture sur clavier d'ordinateur (par ailleurs encore trop peu étudiée), d'une tâche de production orthographique. Enfin il apparaît que notre protocole n'a pas permis d'avoir une sensibilité suffisante pour observer des modulations

d'activité dans le réseau d'écriture dépendant de l'âge d'acquisition des mots produits. Pour observer de telles modulations, nous estimons que les travaux ultérieurs devront viser à maximiser les différences sur la variable linguistique manipulée (tout en contrôlant les stimuli sur d'autres variables) tout en tentant de maîtriser les effets d'habituation à la tâche qui surviennent probablement très rapidement chez des participants chez qui l'écriture est une compétence très automatisée (ayant donc tendance à rapidement devenir une tâche quasiment uniquement motrice).

CHAPITRE IX : ROLE FONCTIONNEL DE LA GMFA ET DU CORTEX PARIETAL SUPERIEUR DANS L'ECRITURE : EXPERIMENTATION PAR rTMS

I. INTRODUCTION

Le travail de méta-analyse présenté plus haut a mis en évidence que l'aire la plus fréquemment et la plus systématiquement activée en imagerie fonctionnelle pendant l'écriture manuscrite était localisée dans le cortex frontal supérieur gauche, au niveau de l'intersection entre le sillon frontal supérieur (SFS) et le sillon précentral (preCS). Le rôle crucial dans l'écriture de cette aire était de plus appuyé par son implication dans tous types de tâches d'écriture (dictée, dénomination écrite, écriture spontanée, au doigt, au stylo, sur clavier d'ordinateur, etc.) et quelle que soit le type de tâche contrôle utilisée (i.e. tâche contrôle « motrice » ou tâche contrôle « linguistique »), ce dernier point suggérant un rôle fonctionnel qui ne serait ni spécifiquement central (i.e. au sens des processus centraux, linguistiques), ni spécifiquement moteur. Conformément au travail de Sugihara et al. (2006), ayant cherché à localiser les « centres » de l'écriture, les résultats de notre méta-analyse ont aussi localisé le centre pariétal de l'écriture au niveau de la partie antérieure du sillon intrapariétal, bien que la présence de plusieurs pics distincts suggère une certaine hétérogénéité.

Dans le but de tester nos hypothèses sur le rôle de la GMFA d'une part, et du cortex pariétal supérieur (CPS) d'autre part (cf. Chapitre III), nous avons utilisé la technique de stimulation magnétique transcrânienne répétitive (rTMS) chez le sujet sain. En effet, la rTMS, utilisée en tant qu'outil permettant de simuler, de manière transitoire et non invasive, une lésion cérébrale, permet de palier aux limites de la neuroimagerie (pour attribuer un rôle fonctionnel, un processus cognitif, à une aire cérébrale particulière), tout en conservant une grande précision spatiale (rarement atteinte en neuropsychologie lésionnelle). Nous avons en effet voulu évaluer les effets comportementaux de l'inhibition de ces sites dans des tâches d'écritures relativement écologiques (écriture manuscrite cursive sur papier avec un stylo). Deux tâches principales ont été utilisées : une tâche d'écriture sous dictée et une tâche de Stroop à l'écrit. Pour pouvoir interpréter les éventuels effets de manière fiable, chaque tâche était réalisée par chacun des

participants à deux reprises : après une stimulation rTMS « réelle » ou active et après une stimulation placebo.

I.1. Tâches comportementales

I.1.1. Tâche d'écriture sous dictée

Dans une première tâche de production écrite sous dictée de mots isolés, les participants avaient pour instruction de simplement écrire des mots entendus sur une tablette graphique. Les différents paramètres de la réponse produite, temps de réaction (ou latences), vitesse d'écriture ou encore distance du tracé, étaient recueillis et utilisés en tant qu'indicateurs des différents processus cognitifs sous-jacents. Ainsi, nous avons considéré que des variations du temps de réaction reflétaient principalement des modulations de l'implication des processus de préparation de la réponse (et d'identification du stimulus) : phonologiques, lexicaux, et orthographiques (incluant la mémoire de travail orthographique), quand des variations de la vitesse d'écriture ou de la distance du tracé reflétaient plutôt des modulations périphériques : coordination et exécution du geste graphomoteur. La même méthodologie et le même dispositif de tablette graphique que dans les expérimentations du chapitre V ont donc été utilisés ici. Plusieurs hypothèses concurrentes relatives aux effets de la rTMS selon le site de stimulation pouvant être formulées, deux propriétés principales des stimuli ont été manipulées : la longueur des mots écrits et leur régularité orthographique. D'autres variables telles que leur fréquence lexicale étaient contrôlées.

Nous avons en effet vu dans les expérimentations du chapitre V que la longueur des mots écrits n'avait pas nécessairement un impact déterminant sur le délai d'initialisation de la réponse, bien que des modulations de ce résultat surviennent lorsque la durée acoustique des stimuli était prise en compte dans le modèle statistique. La vitesse moyenne d'écriture semble en revanche occasionnellement affectée. Il est probable que ces effets, marqueurs du comportement normal, reposent sur une certaine intégrité du système cognitif (et en particulier du buffer graphémique) qui puisse être perturbée par la rTMS.

Ces mêmes données montraient un impact déterminant sur les latences de la régularité orthographique (bien que la position dans le mot de cette irrégularité, que nous n'avons pas manipulée ici, soit tout aussi déterminante). Cet effet de ralentissement des latences d'écriture, souvent rapporté dans la littérature (Bonin & Méot, 2002; Delattre et al., 2006), est interprété comme l'effet d'un conflit entre le produit de la voie phonologique, sous-lexicale, qui constitue l'orthographe du mot par conversion des phonèmes en graphèmes (selon des règles

probabilistes, modélisées par la notion de consistance) et celui de la voie lexicale, dans laquelle l'orthographe est directement récupérée dans en mémoire. Comme précédemment, cet effet comportemental observé en conditions normales repose donc sur l'intégrité de plusieurs processus cognitifs centraux ; phonologiques, lexicaux et orthographiques.

On peut donc s'attendre dans cette tâche de dictée manipulant longueur et régularité orthographique, en dehors du contexte d'une stimulation rTMS inhibitrice, à reproduire des effets tels qu'un faible impact de la longueur des mots mais un fort impact de la régularité orthographique sur les latences.

I.1.2. Tâche de Stroop à l'écrit

La seconde tâche utilisée était une tâche de Stroop à l'écrit. L'« effet Stroop » (MacLeod, 1991; Stroop, 1935) renvoie à un effet d'interférence lexico-sémantique mis en évidence à l'oral par John Stroop en 1935 au travers d'expériences utilisant des cartes sur lesquelles étaient écrits des noms de couleurs (i.e. « vert », « rouge », etc.) avec des encres de différentes couleur (i.e. « vert », « rouge », etc., ou en noir dans une condition contrôle). Selon les cas les participants devaient soit lire le mot écrit sur la carte soit donner le nom de la couleur de l'encre. Les résultats chronométriques de Stroop, maintes fois reproduits depuis, ont ainsi montré que la lecture du mot était très peu affectée par la couleur de l'encre dans laquelle celui-ci était présenté, alors que la dénomination de la couleur de l'encre était, elle, très perturbée par le mot écrit (i.e. lorsque la couleur à nommer est différente de celle désignée par le mot écrit, e.g. « vert » écrit en rouge). Cet effet s'expliquerait par la nature automatique et rapide de la lecture qui générerait une réponse incompatible, entrant en compétition avec la réponse à dénommer (Logan, 1980). Ce phénomène d'interférence de nature lexico-sémantique à l'œuvre dans la tâche de Stroop, impliquant la nécessité d'inhiber la réponse automatique, a beaucoup été utilisé à l'oral, en particulier dans le cadre de la recherche sur le contrôle attentionnel, mais très rarement à l'écrit. Jucla (2009) a comparé les effets comportementaux du Stroop à l'oral et à l'écrit. Ses résultats montrent des effets semblables dans les deux modalités, mais une plus grande variabilité interindividuelle, des temps de réponses plus lents et des effets d'amplitude plus restreinte à l'écrit.

Ici, nous souhaitons utiliser une tâche d'écriture facilement contrôlable ; dans laquelle les propriétés linguistiques des stimuli comptent peu, et dans laquelle des effets comportementaux sont très robustes (et ce pour être en mesure de mettre plus facilement en évidence des modulations du comportement normal liées à l'effet de la stimulation). Cette tâche de Stroop à l'écrit présente en effet certains intérêts par rapport à une tâche plus langagière comme la

dictée comme une absence de biais dans la sélection des stimuli (les mots d'une tâche de dictée varient selon les lettres impliquées, selon leurs propriétés linguistiques, renvoient à différents concepts, les participants peuvent en être plus ou moins familiers, etc.) et une réponse toujours identique au travers des différentes conditions (i.e. le mot « vert » peut par exemple être produit en condition de copie ou de dénomination, en condition congruente ou incongruente). Les différentes conditions de la tâche de Stroop utilisée permettent surtout de questionner différents processus cognitifs de l'écriture et de formuler certaines hypothèses comportementales. La dénomination de la couleur de l'encre nécessite un accès sémantique qui n'est pas nécessaire dans la tâche de copie, plus automatique. Cet « effet d'automatisme » devrait se manifester en condition normales (sans tenir compte d'un éventuel effet de la rTMS), comme cela est le cas à l'oral, par des temps de réponses plus longs dans la tâche de dénomination. Ensuite, l'effet de l'incompatibilité entre la réponse à dénommer et le mot lu (on parlera d'essais « incongruents » par opposition aux essais « congruents ») peut mener à plusieurs hypothèses concurrentes : tout comme les effets de consistance orthographique étudiés dans le chapitre V, le conflit survient à un niveau central, en amont de la programmation motrice du geste d'écriture. Un modèle purement sériel de l'organisation temporelle des processus centraux et périphériques dans l'écriture prédit donc un allongement des latences (lié à la résolution du conflit) sans perturber les autres paramètres de la réponse, telles que la vitesse d'écriture (i.e. le geste moteur est « encapsulé », le mot entier est planifié avant le début de la réponse), quand un modèle en cascade suggèrera la possibilité d'une répercussion de ce conflit sur la dynamique de la production motrice. Jucla (2009), qui avait déjà étudié cette question par le biais du recueil des durées d'écriture des mots dans une tâche de Stroop à l'écrit n'avait pas observé de différences marquant une telle répercussion « périphérique » du conflit « central ». Notre objectif, outre l'étude des effets de la stimulation rTMS sur ces effets d'automatisme et d'incongruence, était ici de reproduire ces résultats sur les effets comportementaux du Stroop à l'écrit.

I.2. Hypothèses

I.2.1. Inhibition de la GMFA

La principale hypothèse que nous avons voulu tester lors de l'inhibition de la GMFA par la rTMS est relative à son implication supposée dans le buffer graphémique. La perturbation de cette composante, par comparaison à une stimulation placebo, devrait se manifester par un effet (i.e. d'augmentation des latences, et/ou de diminution de la vitesse d'écriture, et/ou d'augmentation du nombre d'erreurs orthographiques) restreint ou plus important sur les mots

longs dans la tâche de dictée. Cet effet ne devrait pas être modulé par la régularité orthographique des mots écrits.

Dans l'hypothèse d'un rôle plus central de la GMFA dans l'écriture, sa perturbation par la rTMS devrait conduire au contraire à des effets accrus de l'irrégularité des mots : augmentation des latences, voire plus grande proportion d'erreurs orthographiques.

Enfin, l'hypothèse d'un rôle plus périphérique de la GMFA (comme suggéré par les cas d'agraphies apraxiques consécutives à une lésion dans cette région), suggérerait des effets purement graphomoteurs, pouvant être formalisés par des mesures de la vitesse ou de la distance du tracé (i.e. une distance totale inférieure sur l'écriture d'un même mot en condition de stimulation réelle et placebo traduit une écriture plus petite).

I.2.2. Inhibition du CPS

Comme précédemment, nous rechercherons à distinguer aux travers de l'analyse des effets comportementaux de l'inhibition par rTMS du CPS, des effets périphériques et des effets centraux. L'hypothèse d'un rôle purement sensori-moteur du CPS prédit que sa perturbation, par rapport à une condition placebo, affectera les différents aspects de la dynamique de l'écriture (e.g. vitesses d'écriture) indépendamment du mot écrit : que celui-ci soit court, long, régulier ou irrégulier. Les éventuels effets observés sur les différentes variables recueillies devraient permettre de faire une distinction entre des perturbations ayant trait à la programmation motrice (e.g. sur les temps de réaction) ou plutôt moteurs/sensori-moteurs (e.g. sur la pression exercée par le stylo sur la tablette).

Des effets plus centraux, phonologiques et lexicaux, seront recherchés au travers de l'impact de la régularité orthographique (tels qu'observés par Magrassi et al., 2010 ; en stimulation corticale).

De plus l'interface entre fonctions du langage (i.e. lecture) et motricité étant à la base de l'effet Stroop, l'hypothèse d'un tel rôle d'interface joué par le CPS dans l'écriture, amène à proposer l'hypothèse d'une réduction de cet effet après stimulation par rTMS du CPS. Des effets spécifiques à la tâche (i.e. dénomination de la couleur vs. copie) sont aussi envisagés.

II. MATERIEL ET METHODE

II.1. Participants

Deux groupes de participants ont été constitués afin d'étudier les effets de la stimulation de la GMFA d'une part, et du CPS d'autre part, sur les mêmes tâches comportementales (le protocole était donc strictement identique pour les deux groupes). La méthode de détermination des cibles de la stimulation étant le guidage sur données d'IRMf, les participants à cette expérimentation étaient les mêmes individus ayant participé aux deux études en IRMf précédemment décrites.

Les 16 participants ayant participé à la première étude en IRMf ont participé à l'étude en rTMS ciblant l'aire GMFA gauche, à l'exception d'un participant, perdu de vue, remplacé par un volontaire ayant préalablement participé aux essais pilotes de cette même étude IRMf (et dont nous disposons donc des données anatomiques et fonctionnelles requises pour la neuronavigation).

Les 16 participants ayant participé à la seconde étude en IRMf ont participé à l'étude en rTMS ciblant l'aire du CPS gauche.

II.2. Critères d'inclusion et d'exclusion

Les critères d'inclusions et d'exclusion relatifs à l'utilisation de la rTMS (conformément aux recommandations françaises et internationales quant à l'utilisation de la rTMS inhibitrice basse fréquence ; Lefaucheur et al., 2011; Wassermann, 1998) ont été vérifiés pour chaque participant au moment de la passation de l'expérimentation en IRMf (i.e. incluant une absence de lésion cérébrale, de consommation de substances psychoactives et de risque d'épilepsie). Les données anatomiques acquises lors de cette étape (IRM pondérée en T1 et séquence FLAIR-VISTA), analysées par le Dr. Jean-Albert LOTTERIE, ont par ailleurs permis de vérifier l'absence d'anomalies qui auraient justifié une exclusion du participant de l'étude avant la phase de stimulation.

II.3. Identification de la cible de stimulation

II.3.1. Groupe de stimulation GMFA

Les données d'imagerie fonctionnelle issues des différents contrastes présentaient un fort degré de variabilité interindividuelle et ne permettaient malheureusement pas d'identifier chez chaque participant un pic d'activation correspondant de manière fiable à l'aire GMFA gauche que nous souhaitions cibler par la rTMS (i.e. pic situé au niveau frontal gauche et résultant du contraste entre la tâche d'écriture sous dictée et les tâches motrice et orales). Une procédure dite « en région d'intérêt » a donc été mise en place pour localiser ce pic individuel chez tous les participants de manière identique.

Une région d'intérêt ou ROI (i.e. *Region Of Interest*) a été construite en utilisant la toolbox MarsBar 0.43 pour SPM (Brett et al., 2002) sous la forme d'un sphère de 20 mm de rayon centrée sur les coordonnées MNI de la GMFA gauche telles qu'identifiées dans la méta-analyse présentée plus haut (i.e. $x = -22$; $y = -8$; $z = 54$). Pour éviter des confusions liées à la présence probable de l'aire M1 à l'intérieur de cette sphère, les voxels correspondant à l'aire BA 4 ont été retranchés de cette ROI par soustraction (voir Figure IX-1).

Le choix d'une sphère de cette taille plutôt que d'une région anatomique définie répond autant à la nature de l'aire ciblée (qui s'étend sur au moins deux gyri) qu'à l'exigence de ne point trop circonscire cette recherche du « hot-spot » ; l'opération ayant pour but de tenir compte de la variabilité interindividuelle.

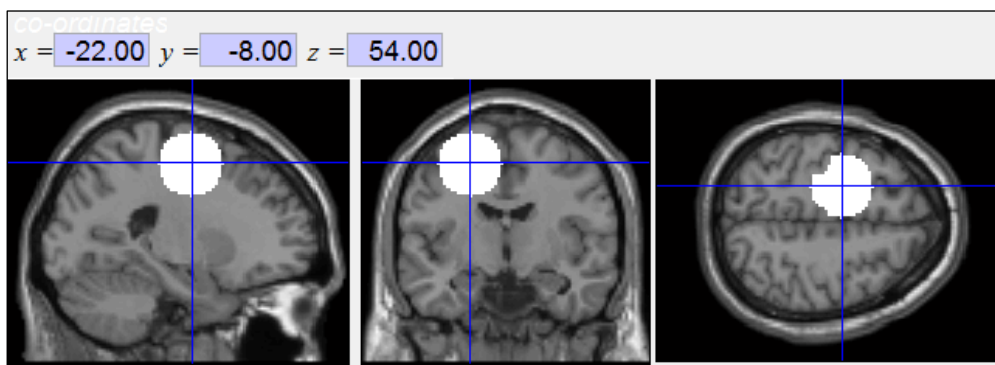


Figure IX-1 : Région d'intérêt utilisée pour localiser le pic d'activité correspondant à la GMFA

Afin de minimiser les biais liés à la normalisation des images BOLD du participant, nous avons souhaité identifier la cible de la stimulation directement sur les images contrastes individuelles non normalisées (tous les traitements et analyses de premier niveau présentées précédemment lors de l'expérimentation IRMf étaient donc réalisées une nouvelle fois, en omettant l'étape de normalisation). La ROI, construite dans l'espace standardisé MNI, était donc

spatialement déformée pour s'adapter à l'espace correspondant à l'image T1 (ou aux images BOLD) du participant. Cette opération, réalisée pour chaque participant, consiste en l'application à la ROI du champ de déformation inverse de celui permettant la normalisation des images EPI (obtenu lors de la phase de segmentation de l'image T1). Elle était réalisée grâce au module « *Deformations* » de SPM 12b. La ROI ainsi définie individuellement était ensuite appliquée en tant que masque inclusif au contraste « *Ecriture vs. Répétition orale* » ($p < 0.05$ avec correction FWE) (non normalisé) et identifiait ainsi, en tant que pic de plus forte intensité, la cible de la stimulation (voir illustration Figure IX-2).

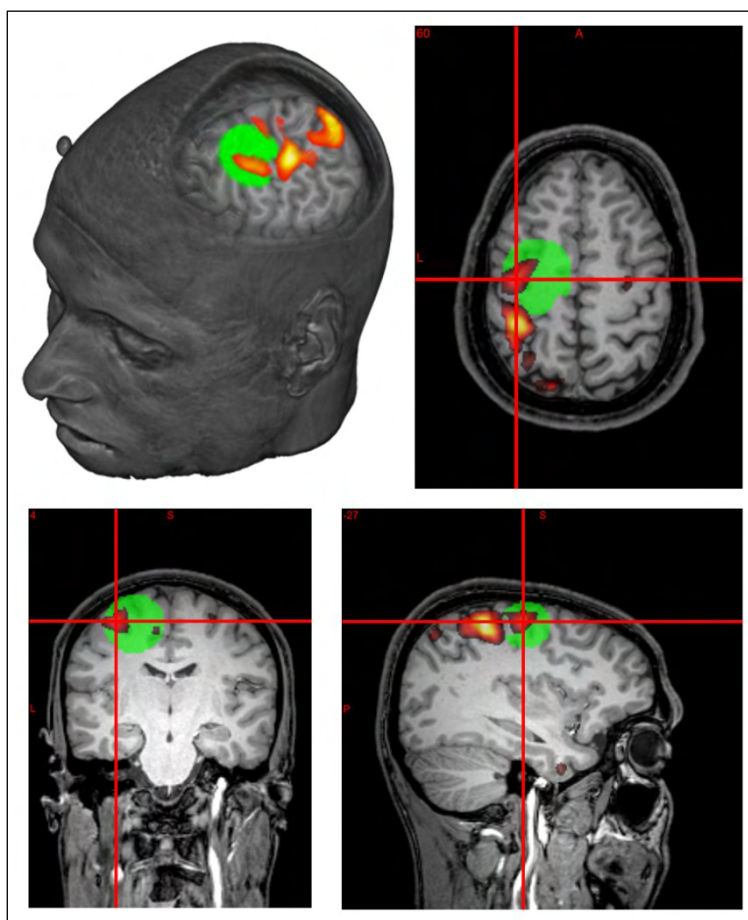


Figure IX-2 : Illustration chez un participant de la localisation fonctionnelle de la cible par superposition de la région d'intérêt (en vert) et du contraste d'imagerie « *Ecriture vs. Répétition orale* » ($p < 0.05$ FWE ; en rouge-jaune), permettant la localisation de la GMFA.

II.3.2. Groupe de stimulation CPS

Là encore l'utilisation unique du contraste d'imagerie « *Ecriture vs. Dessin* » ne s'est pas révélé un moyen fiable d'isoler et localiser l'aire de l'écriture CPS de manière individuelle (comme les résultats de groupe le laissaient supposer). Nous avons donc utilisé la même procédure en région d'intérêt que pour le groupe de stimulation GMFA. Une sphère de 20 mm de rayon, centrée sur les coordonnées MNI du plus important pic pariétal supérieur gauche

identifié dans la méta-analyse (i.e. $x = -32$; $y = -38$; $z = 56$). Une importante partie de cette ROI comportant les régions motrices primaire, l'aire BA 4 a ici aussi été retranchée par soustraction (voir Figure IX-3).

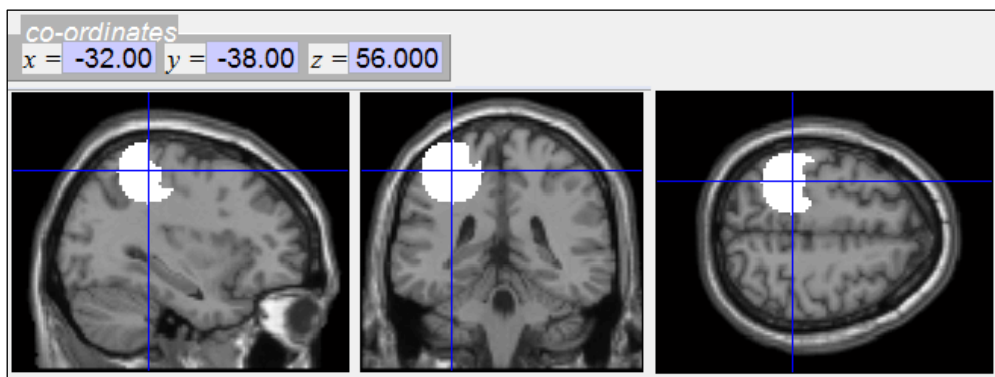


Figure IX-3 : Région d'intérêt utilisée pour localiser le pic d'activité correspondant au CPS

Les données d'IRMf correspondant à la seconde expérimentation ont été traitées à nouveau sans passer par l'étape de normalisation. La ROI du CPS était déformée selon la méthode précédemment décrite était ensuite appliquée en tant que masque inclusif au simple contraste, non normalisé, « Ecriture vs. Ligne de base » ($p < 0.05$ avec correction FWE) (le contraste avec la tâche de dessin s'étant révélé inefficace). Le contraste « Ecriture vs. Epellation orale » n'était pas applicable ici car contrôlait davantage que le simple traitement du stimulus d'entrée (i.e. processus orthographiques). Le pic de plus forte intensité était défini comme la cible de la stimulation du CPS.

II.3.3. Bilan

Une projection dans l'espace standardisé MNI des sites de stimulation des 32 participants (groupe GMFA et groupe CPS), déterminés via la méthode détaillée précédemment (i.e. correspondant à des pics d'activité lors de l'écriture en IRMf), est présentée Figure IX-4. On constate une plus grande dispersion de ces sites pour le groupe stimulé sur le CPS que pour le groupe stimulés sur la GMFA. Certains sites semblent localisés en dehors de la région initialement ciblée (e.g. présents dans le cortex pariétal inférieur) mais il faut noter ces coordonnées transformées (dans l'espace MNI), ne reflètent pas nécessairement parfaitement les particularités de l'anatomie de chaque individu (qui sont un réel sujet de préoccupation en neuroimagerie; voir par exemple Allen, Erhardt, Wei, Eichele, & Calhoun, 2012; Uylings, Rajkowska, Sanz-Arigitia, Amunts, & Zilles, 2005), sur laquelle la stimulation était guidée.

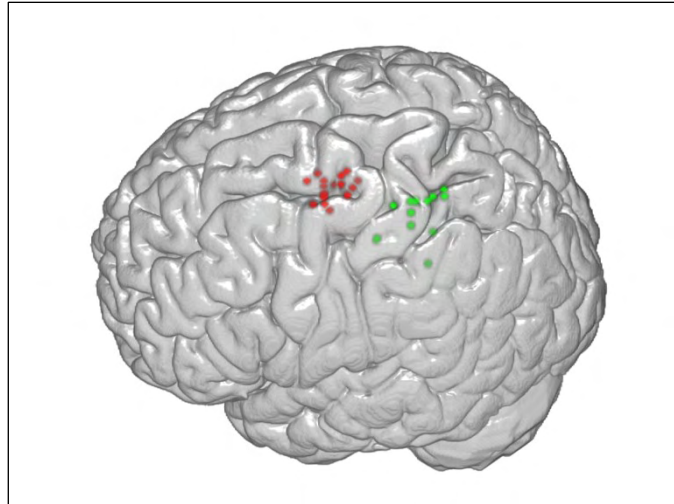


Figure IX-4 : Sites de stimulation des 16 participants stimulés sur la GMFA (en rouge) et des 16 participants stimulés sur le CPS (en vert).

II.4. Procédure

II.4.1. Détermination du seuil moteur

L'intensité de stimulation souhaitée lors de cette expérimentation était fixée à 100% du seuil moteur ou MT (pour *Motor Threshold*). La détermination du seuil moteur était réalisée chez chaque participant selon la procédure suivante :

- La bobine TMS était positionnée de manière tangentielle à la surface du crâne au niveau du cortex moteur primaire de l'hémisphère gauche (repéré relativement au vertex)
- Des stimulations uniques (« single pulse ») répétées (à une fréquence inférieure à 0,5 Hz) étaient appliquées à une intensité de 50% du stimulateur. La position de la bobine était ajustée jusqu'à ce qu'une telle stimulation provoque une contraction visible au niveau du muscle FDI de la main controlatérale (le *First Dorsal Interosseous* est un muscle de l'index). En cas d'échec, l'intensité de stimulation était augmentée par pas de 5%.
- L'intensité de stimulation était ensuite diminuée par pas de 2% puis 1% jusqu'à obtenir l'intensité provoquant une contraction visible dans 50% des cas (5 fois sur 10 stimulations consécutives).

A l'instar d'une méthodologie alternative utilisant l'électromyographie, la fiabilité et la reproductibilité de cette méthode de l'observation du mouvement pour déterminer le seuil moteur a été validée par plusieurs auteurs (e.g. Varnava, Stokes, & Chambers, 2011).

II.4.2. Neuronavigation

Le positionnement de la bobine TMS précisément au-dessus de la cible était rendu possible par l'utilisation d'un système de neuronavigation (eXimia NBS, ©Nexstim). Ce système est composé d'un ordinateur avec un logiciel dédié dans lequel est chargée l'image anatomique du participant (T1) et son image fonctionnelle (restreinte par le masque de la ROI), ainsi que de différents capteurs (sur la bobine TMS et sur le visage du participant sous la formes de lunettes) couplés à une caméra infrarouge. Après une phase de calibration du système, une représentation à l'écran en 3D temps réel des différents éléments permet le positionnement de la bobine de manière optimale (voir Figure IX-5).

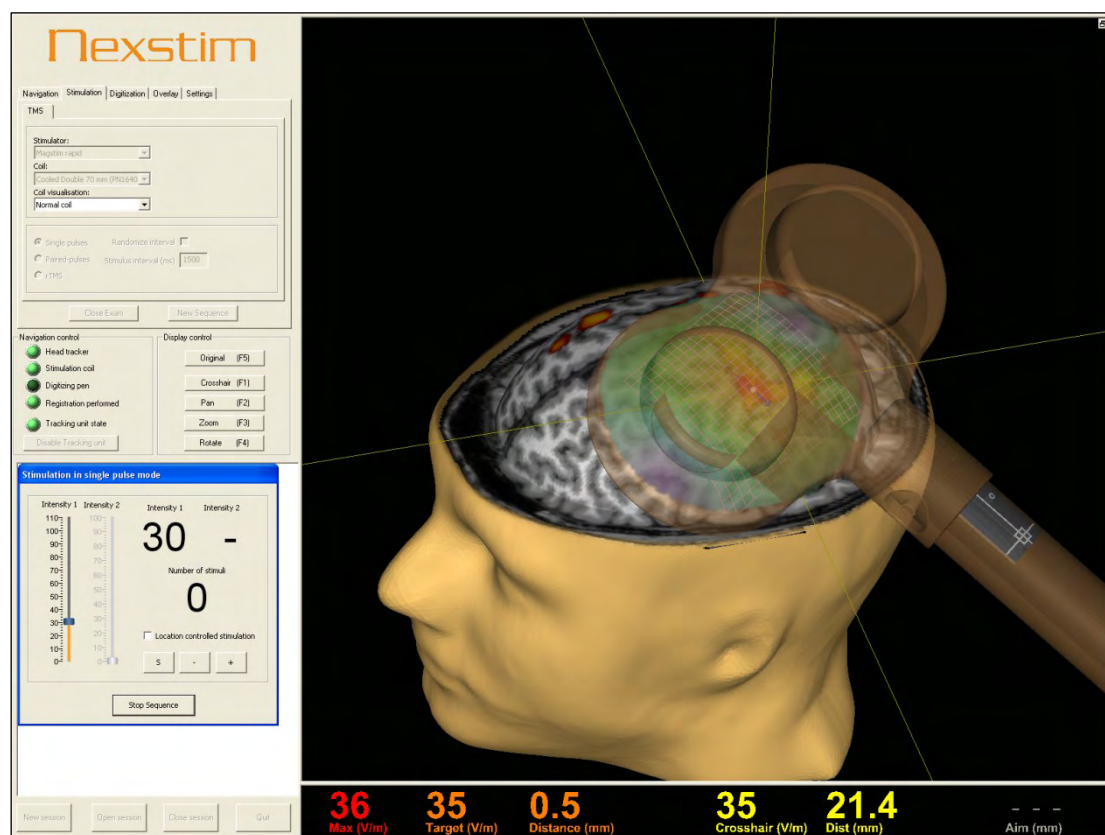


Figure IX-5 : Capture d'écran du logiciel de neuronavigation permettant le guidage de la bobine TMS au-dessus de la cible avec précision.

II.4.3. Stimulation

La bobine TMS, soutenue par un bras articulé, était positionnée de manière tangentielle à la surface du crâne du participant et orientée de sorte de procurer l'intensité de stimulation maximale prédite par le logiciel de neuronavigation.

La stimulation était effectuée grâce à une bobine double 70mm (en forme de huit) à refroidissement à air (Magstim P/N 1640-00) équipée sur un stimulateur Magstim Rapid² (The

MAGSTIM Company Limited). L'intensité de stimulation était fixée à 100% du seuil moteur et la fréquence de répétition des pulses était de 1 Hz. L'intensité était choisie par compromis entre les intensités utilisées dans les études antérieures (souvent 110 % dans les travaux sur l'attention visuelle, parfois 90 % dans les études sur le langage) et la volonté de limiter la différence ressentie entre la condition de la stimulation réelle et la stimulation placebo. La durée de stimulation était fixée à 20 min.

Une condition contrôle placebo utilisant une bobine spécifique air (Magstim P/N 9925-00) était utilisée. Une stimulation placebo idéale doit répondre à 4 critères selon Loo et al. (2000) : aucun effet physiologique sur le cortex ciblé contrairement à la stimulation active, mais une même position de la bobine sur le scalp, une même sensation somesthésique sur le scalp (produite par la TMS, liée à la stimulation des nerfs superficiels et des muscles) et un même artefact auditif que la stimulation active (« clic » produit par le stimulateur). La méthodologie et la bobine utilisée répondait à ces différents critères, bien que la sensation somesthésique produite par la bobine placebo ne sous ait pas semblé complètement équivalente à la bobine active (particulièrement à de fortes intensités de stimulation).

II.4.4. Déroulement

L'objectif de l'expérimentation était d'étudier les éventuels effets comportementaux d'une stimulation rTMS inhibitrice (1 Hz) de l'aire GMFA gauche et de l'aire du CPS gauche chez des volontaires sains droitiers. Une séance de stimulation, passive, du participant d'une durée de 20 minutes était directement suivie de la passation de tâches expérimentales d'écriture pour une durée moindre ou équivalente. La durée des « post-effets » consécutifs à une telle stimulation étant généralement considérée comme équivalente à la durée de stimulation elle-même.

Afin d'évaluer de manière fiable les effets comportementaux de la stimulation en rTMS de l'aire ciblée, chaque participant réalisait deux fois les tâches d'écriture ; suivant la stimulation active et suivant une stimulation placebo (ou « sham ») réalisée grâce à une bobine placebo. Afin de contrebalancer l'ordre de passation (« TMS active » - « TMS placebo »), chacun des deux groupes de stimulation de 16 participants (i.e. « GMFA » et « CPS ») était séparé en deux sous-groupes de 8 participants (voir Figure IX-6). Les participants du premier sous-groupe commençaient par la stimulation active, puis après la passation des tâches d'écriture et une pause d'environ 20 minutes, subissaient la stimulation placebo. L'ordre était inversé pour le second sous-groupe.

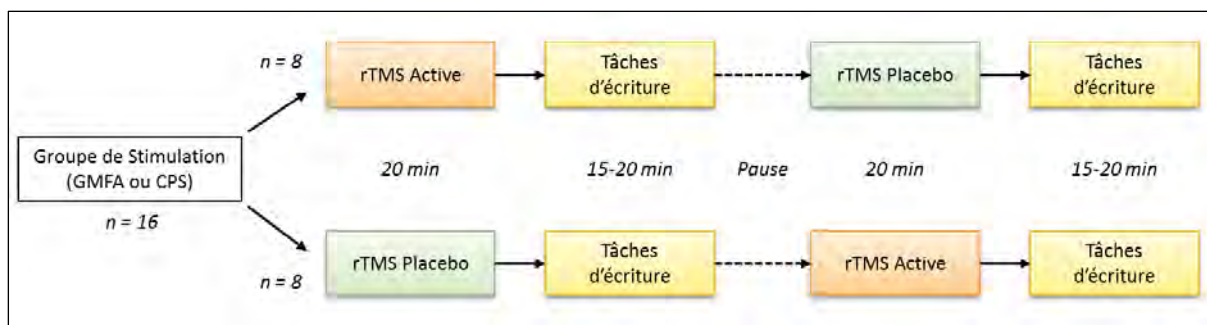


Figure IX-6 : Déroulement de l'expérimentation pour chaque sous-groupe

II.5. Tâches comportementales

Directement après chacune des deux phases de stimulation (rTMS réelle ou placebo), les participants étaient soumis à deux tâches d'écriture consécutives (et une troisième tâche graphomotrice, voir ci-après) : une tâche d'écriture sous dictée et une tâche de Stroop à l'écrit. L'ordre des tâches était contrebalancé entre les participants. Ces tâches étant répétées de manière identique (à l'exception de l'ordre de présentation des stimuli) après chaque phase de stimulation, deux jeux de données « identiques » étaient donc recueillis pour chaque participant. La passation de ces tâches lors de chaque session comportementales durait selon les participants entre 14 et 18 minutes.

II.5.1. Tâche d'écriture sous dictée

II.5.1.1. Stimuli

96 items ont été sélectionnés, répartis en 2 x 2 catégories selon leur Longueur (deux conditions : « Courts » vs. « Longs ») et leur Régularité orthographique (« Réguliers » vs. « Irréguliers ») (cf. Annexe 7). Ces items étaient tous des noms, monomorphémiques, ne présentant pas d'homophones (cf. Table IX-1 pour un résumé de leurs caractéristiques linguistiques). Les mots longs comportaient en moyenne 9,2 ($\pm 1,1$) lettres et 3 syllabes et les mots courts 5,5 ($\pm 0,5$) lettres et 2 syllabes. La sélection de mots réguliers et irréguliers était basée sur les analyses de Soum (1997) portant à la fois sur des séquences initiales, finales et internes. Les mots irréguliers comportaient de 1 à 3 relations phonème-graphème irrégulières, localisées à différentes positions (de manière équilibrée). La fréquence lexicale (*Fréquence Livres*, Lexique 3.80 ; New et al., 2001), en moyenne de 16,2 ($\pm 14,2$) unités par million, était équilibrée au travers des différentes conditions (Courts-Réguliers : 18,3 ; Courts-Irréguliers : 15,6 ; Longs-Réguliers : 15,1 ; Longs-Irréguliers : 15,8). Les mots trop fréquents ou trop rares étaient évités.

Les stimuli, prononcés par une locutrice avec un accent et une intonation neutres, étaient enregistrés avec le même matériel que décrit Chapitre V.I.2.

Table IX-1 : Caractéristiques linguistiques des items utilisés dans la tâche d'écriture sous dictée (n = 96) en fonction de leur longueur puis de leur régularité. Les valeurs en gras indiquent une différence significative à un test T de Student (i.e. Longs vs. Courts ou Réguliers vs. Irréguliers). * : $p < .05$, *** : $p < .0001$.

	Longueur des mots		Régularité	
	Courts	Longs	Réguliers	Irréguliers
Nombre de lettres	5,5***	9,2***	7,3	7,4
Nombre de phonèmes	4,5***	7,2***	5,9	5,8
Nombre de syllabes	2,0***	3,0***	2,5	2,5
Fréquence Films (lemmes)	19,5	15,8	19,9	15,3
Fréquence Livres (lemmes)	24,9	21,8	24,4	22,3
Fréquence Films	14,9	12,6	15,3	12,1
Fréquence Livres	16,9	15,5	16,7	15,7
Fréquence de trigrammes (token)	672*	1107*	1074	705
Fréquence de trigrammes (type)	1883	2788	2784	1888
Fréquence de bigrammes (token)	7003	7580	7764	6819
Fréquence de bigrammes (type)	19988	21350	22040	19298
Voisins phonologiques	6,0***	0,6***	2,9	3,7
Point d'unicité phonologique	4,4***	6,6***	5,6	5,4
Durée Acoustique (ms)	433***	649***	546	537

II.5.1.2. Procédure

La tâche proposée était une tâche de production écrite sous dictée de mots isolés réalisée sur tablette graphique. Elle était réalisée avec le même matériel dans les mêmes conditions que la seconde expérimentation du Chapitre V (partie III). Les participants avaient pour consigne d'écrire le mot entendu de façon usuelle (écriture cursive, en minuscules), dès sa perception (i.e. débiter la production le plus rapidement possible), en évitant de faire des fautes d'orthographe, mais d'un seul jet et sans jamais revenir en arrière. Les participants déclenchaient eux-mêmes l'apparition du stimulus auditif en pressant un bouton sur la tablette avec leur main gauche. Celui-ci survenait après une latence d'une seconde. L'essai suivant ne débutait pas avant que le participant n'ait à nouveau pressé le bouton. Une feuille de papier A4 comportant 48 cadres rectangulaires, placée sur la tablette, permettait de recueillir les réponses. Un enregistrement continu de la production (à une fréquence de 200 Hz) était réalisé grâce au logiciel Eye and Pen 1.1 (Alamargot et al., 2006; Chesnet & Alamargot, 2005), aussi utilisé pour délivrer les stimuli.

II.5.2. Tâche de Stroop à l'écrit

II.5.2.1. Tâches, conditions et stimuli

La tâche de Stroop à l'écrit était composée de deux tâches et de deux conditions. 3 couleurs étaient utilisées dans chacune (vert, rouge et bleu). Dans une première tâche, un nom de couleur, écrit d'une certaine couleur, était présenté à l'écran et participants avaient pour instruction de nommer à l'écrit la couleur de l'encre (sans tenir compte du mot) : tâche de dénomination. Par exemple, écrire « *vert* » lorsque le stimulus présenté était « **ROUGE** ». Lors de la seconde tâche, un même stimulus était présenté et les participants devaient copier le mot présenté sans tenir compte de sa couleur : tâche de copie. Par exemple, écrire « *bleu* » lorsque le stimulus présenté était « **BLEU** ».

Au sein de chacune de ces deux tâches, deux types de stimuli étaient présentés, constituant deux conditions. Dans une condition dite « congruente », la couleur désignée par le mot était identique à la couleur de l'encre (e.g. **BLEU**), dans une condition dite « incongruente » la couleur désignée par le mot était différente de la couleur de l'encre (e.g. **ROUGE**). Nous n'avons pas utilisé de condition neutre (e.g. mot présenté en noir).

Chaque tâche (copie et dénomination) comportait 24 essais, dont la moitié était composée d'essais congruents et l'autre moitié d'essais incongruents. Les stimuli étaient équilibrés de sorte que la proportion de bonnes réponses écrites « vert », « rouge » et « bleu », était identique au sein de chaque tâche et condition.

II.5.2.2. Procédure

Les deux tâches (copie et dénomination) étaient réalisées consécutivement. L'ordre des tâches était alterné aux travers des participants et des sessions (e.g. Copie puis dénomination pour la session après TMS active et dénomination puis copie pour la session après TMS placebo). La consigne était rappelée avant de débiter chaque tâche. Par ailleurs, plusieurs ordres de présentation des stimuli, construits de manière aléatoire, étaient utilisés.

Le matériel utilisé était identique à celui utilisé dans la tâche de dictée. Les réponses étaient recueillies sur une feuille de papier A4 comportant 48 cadres rectangulaires, placée sur la tablette. Comme précédemment les participants avaient pour instruction de commencer à écrire le plus rapidement possible dès l'apparition du stimulus. Là encore, ils déclenchaient eux-mêmes l'apparition du stimulus visuel en pressant un bouton sur la tablette avec leur main

gauche. Celui-ci survenait après une latence d'une seconde et l'essai suivant ne débutait pas avant une nouvelle pression sur le bouton.

II.5.3. Tâche de barrage

Une tâche complémentaire était ajoutée au protocole, visant à mettre en évidence d'éventuels effets périphériques et moteurs latéralisés, non langagiers, suite la stimulation. Celle-ci était adaptée de l'épreuve de pointillage de Stambak (1960) visant à évaluer le degré de latéralité manuelle d'enfants. Lors de cette tâche, une feuille A4 sur laquelle était présenté un quadrillage de 25 x 18 carrés de 1 cm² était proposée aux participants. Ils avaient pour instruction de tracer un seul trait dans chaque carré avec le stylo, le plus rapidement possible, sans en oublier et sans revenir en arrière, de manière continue pendant une minute. Cette tâche était réalisée deux fois ; avec la main droite puis avec la main gauche.

II.5.4. Analyse des données

Le logiciel Eye & Pen 1.1 permettait d'extraire toutes les données utiles à la caractérisation de chaque production, dans chaque essai des tâches d'écriture sous dictée et de Stroop à l'écrit : latence de la réponse, durée de la production, distance parcourue par le stylo, pression en chaque point. La vitesse d'écriture moyenne, et la pression d'écriture moyenne dans chaque essai étaient déduites de ces données. Afin de localiser d'éventuels effets sur la vitesse d'écriture au sein de chaque production, les vitesses instantanées en chaque points ont été extraites pour en déduire la vitesse moyenne sur cinq portions de la durée de chaque production (cf. Chapitre V partie III). Chaque participant réalisant la tâche à deux reprises nous disposions pour chacun d'autant de données pour une première session (Session 1 ; stimulation active ou placebo) que pour une seconde (Session 2 ; stimulation active ou placebo).

Les données de chaque variable (i.e. latences, vitesses moyennes, distances, pressions moyennes) ont été analysées sous R (R Development CoreTeam, 2009) en utilisant les modèles linéaires mixtes via le package lme4 (Bates & Maechler, 2009) (cf. Chapitre V.I.2). Pour l'analyse des données issues de la tâche de dictée, les facteurs *Sujet* et *Item* étaient à chaque fois inclus dans le modèle en tant qu'effets aléatoires. Du fait de la présence dans le jeu de données de plusieurs données « identiques » par participant (i.e. réponse aux mêmes stimuli en Session 1 et en Session 2), la prise en compte de l'effet « Sujet » était cruciale. Les effets fixes étaient les facteurs *Longueur* (Mot court vs. Mot long), *Régularité* (Mot régulier vs. Mot irrégulier), *Stimulation* (Active – GMFA ou CPS – vs. Placebo) et *Session* (Session 1 vs. Session 2) (toutes les

interactions étaient par ailleurs incluses dans le modèle). Pour l'analyse des latences uniquement, l'effet simple de durée acoustique du stimulus était inclus dans le modèle (covariable continue, voir Chapitre V.I.2).

L'inclusion de ces deux facteurs *Stimulation* et *Session* dans un même modèle permet de les interroger chacun indépendamment sans pour autant négliger leur influence respective. En effet, un important effet d'apprentissage « test-retest » était attendu ; les participants étant souvent plus rapides la deuxième fois qu'ils réalisent une même tâche. Cet effet doit cependant être distingué d'un éventuel effet de la stimulation (e.g. la diminution des temps de réponse lors de la deuxième session est-elle plus importante après une stimulation active ?). Malgré que l'ordre de passation soit équilibré entre les participants (deux sous-groupes de 8 participants selon l'ordre de succession des deux types de stimulation, active et placebo), certains biais peuvent survenir dans ce type de protocole expérimental (e.g. en Session 1, les données de la condition Placebo et de la condition rTMS ne sont pas issues des mêmes individus) ; en particulier dans une tâche comme l'écriture générant de grands écart-types interindividuels. Ainsi, l'utilisation d'un modèle mixte englobant à la fois le facteur aléatoire *Sujet* et les effets *Stimulation* et *Session* en facteur fixes nous a semblé comme une solution idéale pour contrôler ces différents biais.

Comme précédemment (cf. Chapitre V.I.2.5), le packages *lmerTest* (Kuznetsova et al., 2013) était utilisé pour déterminer la significativité des effets principaux et des interactions, puis le package *lsmeans* (Lenth, 2013) pour les tests post-hoc (méthode de Tukey HSD) sur les résultats du modèle linéaire mixte. Lorsque l'effet principal de la stimulation était significatif, un test post-hoc était conduit pour évaluer cet effet au travers des différentes catégories de mots (voir section III.1.2 ci-après).

L'analyse des données de la tâche de Stroop à l'écrit était conçue de manière identique ; incluait le facteur aléatoire *Sujet* et les facteurs fixes *Tâche* (Dénomination Ecrite vs. Copie), *Congruence* (Congruent vs. Incongruent), *Stimulation* (Active – GMFA ou CPS – vs. Placebo, ci-après « rTMS vs. Placebo ») et *Session* (Session 1 vs. Session 2). La pertinence de l'ajout dans le modèle du facteur *Mot Ecrit* (« Vert » vs. « Rouge » vs. « Bleu ») a été testée au cas par cas via un test du rapport de vraisemblance (ce facteur nécessitant par exemple d'être contrôlé lorsque l'on s'intéresse à la distance du tracé).

III. RESULTATS : GROUPE DE STIMULATION GMFA

III.1. Ecriture sous dictée

Des analyses statistiques ont été successivement conduites sur les taux d'erreur, les latences, les vitesses moyennes d'écriture, les distances du tracé, la pression moyenne puis les vitesses par portion de durée. Les moyennes et écart-types des variables recueillies dans chaque condition et en fonction du type de stimulation sont présentées dans la Table IX-2 ci-après.

Table IX-2 : Valeurs moyennes (et écart-types) des différentes variables recueillies en fonction des différentes conditions dans la tâche d'écriture sous dictée. Le facteur Session n'y figure pas ; les moyennes étant calculées au travers des Session 1 et 2 (ce qui explique en partie les importants écart-types sur les latences).

	Placebo				rTMS (GMFA)			
	Courts		Longs		Courts		Longs	
	Réguliers	Irréguliers	Réguliers	Irréguliers	Réguliers	Irréguliers	Réguliers	Irréguliers
Taux d'erreur (%)	5,5 (4,7)	10,9 (7)	2,1 (3)	12 (10,5)	5,5 (5,4)	11,7 (7,3)	2,3 (3,7)	14,3 (10,6)
Latences (ms)	763 (132)	772 (145)	806 (152)	863 (166)	766 (139)	769 (150)	809 (169)	890 (183)
Vitesses (cm/s)	2,89 (0,8)	2,91 (0,8)	2,78 (0,7)	2,75 (0,7)	2,92 (0,8)	2,97 (0,8)	2,8 (0,7)	2,81 (0,7)
Distances (cm)	5,8 (1,9)	6,1 (2)	8,9 (2,6)	9,4 (2,5)	5,8 (1,9)	6,2 (1,8)	8,8 (2,4)	9,5 (2,4)
Pression (u.a.)	317 (133)	328 (139)	316 (132)	318 (126)	306 (116)	319 (121)	304 (117)	312 (117)

III.1.1. Taux d'erreurs

Afin d'analyser les taux d'erreurs dans un modèle linéaire mixte prenant en compte la variabilité inter-sujets, nous avons inclus dans une analyse les taux d'erreurs pour chaque participant dans chacune des plus petites sous-conditions (e.g. Sujet 1, session 1 / placebo, mots courts et réguliers ; soit taux d'erreurs calculé sur 24 items). Le modèle était donc calculé sur 128 valeurs (16 sujets * 2 conditions de Longueur * 2 condition de Régularité * 2 Sessions/Stimulations), incluait les effets fixes de Longueur, de Régularité, de Session et de Stimulation (et toutes leurs interactions), ainsi que l'effet aléatoire Sujet.

Les résultats obtenus montraient que les taux d'erreurs étaient significativement supérieurs pour les mots irréguliers (12,2%) par rapport aux mots réguliers (3,8%) ($F(1, 98) = 80,0$; $p < .0001$). Une interaction avec la longueur était aussi présente ($F(1, 98) = 7,3$; $p < .01$) traduisant un impact de l'irrégularité plus important sur les mots longs (+10,9%, $T(98) = 8,2$; $p < .0001$) que sur les mots courts (+5,9%, $T(98) = 4,4$; $p < .001$).

III.1.2. Latences d'écriture

Sur les 3 072 latences attendues (16 sujets * 96 mots * 2 sessions), après suppression des essais échoués (8,0%) et des valeurs extrêmes (supérieures à 2000 ms ou inférieures à 400 ms ; représentant 0,1 % des essais corrects), le jeu de données utilisé dans l'analyse contenait 2 821 valeurs. Après calcul d'un premier modèle, les *outliers* (i.e. définis comme résidus supérieurs ou inférieurs à la moyenne de 2,5 écart-types) étaient systématiquement exclus du calcul du modèle final (soit 2,3 % des latences restantes). La durée acoustique du stimulus était incluse dans le modèle, ce qui permettait d'améliorer la qualité de l'ajustement (par rapport au modèle plus simple ne l'incluant pas : $\chi^2 = 45,92$; $p < .0001$).

Les effets principaux des facteurs (ou effets fixes) Durée acoustique ($F(1, 90) = 26,8$; $p < .0001$), Régularité (Réguliers : 787 ms vs. Irréguliers : 832 ms ; $F(1, 90) = 14,8$; $p < .002$), Stimulation (rTMS : 815 ms vs. Placebo : 805 ms ; $F(1, 2635) = 6,12$; $p < .02$) et Session (Session 1 : 855 ms vs. Session 2 : 765 ms ; $F(1, 2635) = 486,2$; $p < .0001$) étaient significatifs. L'effet de longueur n'était pas significatif dans ce modèle incluant la durée acoustique (Courts : 810 ms vs. Longs : 810 ms ; $p = .97$) mais l'était dans le modèle plus simple (Court : 774 ms vs. Long : 846 ms ; $F(1, 91) = 28,8$; $p < .0001$; résultats complets non rapportés)

Le facteur Longueur interagissait de manière significative avec la Régularité ($F(1, 90) = 7,60$; $p < .008$) et la Session ($F(1, 2635) = 8,60$; $p < .004$), et de manière tendancielle avec la stimulation ($F(1, 2635) = 3,11$; $p = .078$). L'interaction Régularité x Session était aussi significative ($F(1, 2636) = 18,2$; $p < .0001$). Des interactions significatives de troisième ordre incluant le facteur Stimulation étaient aussi présentes (Stimulation x Longueur x Session : $p < .001$; Stimulation x Régularité x Session : $p < .03$; ou de manière marginale Stimulation x Longueur x Régularité : $p = .082$).

Les analyses post-hoc d'intérêt conduites (e.g. effet de régularité sur les mots courts ou longs et effet de longueur sur les mots réguliers ou irréguliers) ont révélé que l'interaction Longueur x Régularité reflétait un effet de régularité présent uniquement sur les mots longs (où Réguliers : 772 ms vs. Irréguliers : 849 ms ; $T(90) = 4,67$; $p < .0001$). Outre l'important effet de la session sur les mots réguliers et irréguliers, l'interaction Régularité x Session reflétait un fort effet de régularité dans la première session (Régulier : 824 ms vs. Irrégulier : 886 ms ; $T(115) = 5,00$, $p < .0001$), mais atténué sur la seconde (Régulier : 751 ms vs. Irrégulier : 779 ms ; $T(113) = 2,26$, $p < .03$) (voir graphiques de la Figure IX-7). L'analyse de l'interaction Longueur x Session n'a quant à elle rien révélé de plus que l'effet de la session sur les mots courts et sur les mots longs.

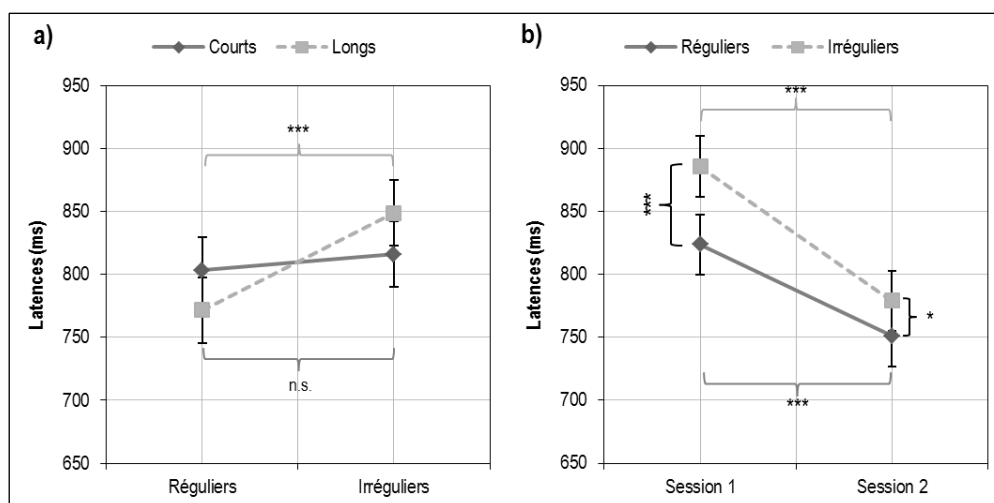


Figure IX-7 : a) Interaction entre la régularité et la longueur et b) interaction entre la régularité et la session sur les latences en production écrite sous dictée. On constate un impact négatif de l'irrégularité uniquement sur les mots longs (+77 ms), puis au-delà d'un important effet de Session, un impact négatif de l'irrégularité uniquement en Session 1 (+62 ms, contre +28 ms en Session 2). n.s. : non significatif, *** : $p < .0001$.

Enfin, afin de déterminer si l'effet significatif de la stimulation était différent selon les différentes catégories de mots (courts ou longs, réguliers ou irréguliers) l'analyse post-hoc correspondante a été conduite⁷. Cette analyse révélait une différence significative entre Placebo et rTMS sur les mots longs (802 ms vs. 819 ms : $T(2635) = 3,01$; $p < .003$), sur les mots irréguliers (826 ms vs. 839 ms : $T(2638) = 2,24$; $p < .03$) et sur les mots longs et irréguliers (835 ms vs. 863 ms : $T(2635) = 3,28$; $p < .002$).

III.1.3. Vitesses moyennes d'écriture

Comme précédemment, sur les 3 072 vitesses moyennes attendues, après suppression des essais échoués (8,0%) et des valeurs extrêmes (supérieures à 6,0 cm/s ou inférieures à 1,5 cm/s ; représentant 0,6 % des essais corrects), le jeu de données utilisé dans l'analyse contenait 2 809 valeurs. Les *outliers* exclus dans un second temps représentaient 2,4 % des données restantes.

Les effets simples de Longueur (Courts : 2,93 cm/s vs. Longs : 2,79 cm/s ; $F(1, 91) = 10,5$; $p < .002$), de Session (Session 1 : 2,85 cm/s vs. Session 2 : 2,87 cm/s ; $F(1, 2619) = 7,0$; $p = .01$)

⁷ Sous R : `lsmeans(lmer.modelB, list(pairwise ~ Stimulation | Longueur, pairwise ~ Stimulation | Régularité, pairwise ~ Stimulation | (Longueur*Régularité))`

et de Stimulation (Placebo : 2,85 cm/s vs. rTMS : 2,88 cm/s ; $F(1, 2619) = 7,9$; $p < .005$) étaient significatifs. Aucune interaction significative entre ces facteurs n'était présente.

Comme précédemment, nous avons voulu tester dans un test post-hoc si l'effet significatif de la Stimulation était présent sur les différentes catégories de mots. Ce test a révélé que l'effet de la stimulation (Placebo vs. rTMS active) était présent sur les mots courts (+0,03 cm/s : $T(2621) = 2,05$; $p < .04$) mais de manière marginale sur les mots longs (+0,03 cm/s : $T(2620) = 1,92$; $p = .054$). Puis absent sur les mots réguliers (+0,01 cm/s : $T(2620) = 0,92$; $p = .36$) (qu'ils soient courts ou longs) mais présent les mots irréguliers (+0,05 cm/s : $T(2621) = 3,00$; $p < .003$) (qu'ils soient courts ou longs).

III.1.4. Distance du tracé

L'analyse de la distance du tracé des mots écrits (exprimées en cm, après conversion des unités tablette), après suppression des essais échoués et de 0,3% de valeurs extrêmes (supérieures à 18 cm ou inférieures à 2 cm) impliquait 2 817 valeurs. Les *outliers* exclus représentaient 2,7 % des données restantes.

Les effets de Longueur (Courts : 6,1 cm vs. Longs : 9,3 cm ; $F(1, 92) = 270,2$; $p < .0001$), de Régularité (Réguliers : 7,4 cm vs. Irréguliers : 7,9 cm ; $F(1, 92) = 7,3$; $p < .009$) et de Session (Session 1 : 7,8 cm vs. Session 2 : 7,6 cm ; $F(1, 2619) = 36,0$; $p < .0001$) étaient significatifs.

L'inclusion dans le modèle de la covariable « Nombre de lettres », conçue dans le but d'isoler d'éventuels effets sur la « taille » du tracé (i.e. distance du tracé par mot à *nombre de lettres égal*), permettait d'améliorer la qualité de l'ajustement ($\chi^2 = 37,07$; $p < .0001$). Dans ce nouveau modèle, outre l'effet du nombre de lettres ($F(1, 91) = 76,6$; $p < .0001$) et à l'exception de l'effet de longueur ($F(1, 91) = 1,3$; $p = .25$), les effets de Régularité (Réguliers : 7,5 cm vs. Irréguliers : 7,9 cm ; $F(1, 91) = 7,8$; $p < .007$) et de Session (Session 1 : 7,8 cm vs. Session 2 : 7,6 cm ; $F(1, 2621) = 36,0$; $p < .0001$) restaient significatifs.

III.1.5. Pression moyenne

La pression moyenne d'écriture dans chaque essai était recueillie à partir de la valeur de pression en chaque point, en unité arbitraires, fournie par Eye & Pen 1.1. Tous les essais corrects ont d'abord été inclus dans le calcul du premier modèle. Les *outliers* exclus représentaient ensuite 2,5 % des données.

Les effets de Longueur (Courts : 320,2 vs. Longs : 314,4 ; $F(1, 92) = 5,74$; $p < .02$), de Session (Session 1 : 325,9 vs. Session 2 : 308,7 ; $F(1, 2638) = 120,2$; $p < .0001$) et de Stimulation (Placebo : 322,9 vs. rTMS : 311,6 ; $F(1, 2638) = 52,0$; $p < .0001$) étaient significatifs. La triple interaction Longueur x Session x Stimulation était aussi significative ($F(1, 2644) = 5,4$; $p < .02$). Des tendances non significatives apparaissaient également : Régularité (Réguliers : 315,1 vs. Irréguliers : 319,5 ; $F(1, 92) = 3,32$; $p = .07$), Longueur x Session ($F(1, 2638) = 3,77$; $p = .052$) et Session x Stimulation ($F(1, 14) = 4,42$; $p = .054$).

Une analyse post-hoc de l'effet significatif de Stimulation au travers des différentes catégories de mots (i.e. facteurs Longueur et Régularité) a révélé que celui-ci était présent quel que soit le type de mot.

III.1.6. Vitesses par portion de durée

Afin d'identifier d'éventuels effets sur les vitesses localisés sur des portions du mot produit (e.g. l'effet de la stimulation sur les vitesses moyennes d'écriture relève-t-il d'une accélération globale ou uniquement pendant le début, la fin, de chaque production ?), les vitesses instantanées en chaque point ont été mesurées, puis les vitesses moyennes selon des portions de la durée d'écriture (i.e. séquences 0-20%, 20-40%, 40-60%, 60-80% et 80-100%) ont été calculées (cf. Chapitre V, partie III.3).

Des analyses indépendantes ont été conduites sur les vitesses moyennes de chacune de ces 5 portions de durée, pour les mots courts, puis pour les mots longs (l'écart de durée d'écriture entre mots longs et courts nous semblant trop important pour permettre leur regroupement dans la même analyse). Les facteurs fixes et aléatoires utilisés étaient les mêmes que précédemment, à l'exception du facteur Longueur.

Concernant les mots courts, les seuls effets significatifs observés étaient situés sur la première séquence (0-20% de la durée, soit en moyenne de 0 à 415 ms) : effet de la session (Session 1 : 3,30 cm/s vs. Session 2 : 3,45 cm/s ; $F(1, 1314) = 5,8$; $p < .02$) et effet de la Stimulation (Placebo : 3,29 cm/s vs. rTMS : 3,46 cm/s ; $F(1, 1314) = 11,0$; $p < .001$).

Concernant les mots longs, on observait sur la première séquence (0-20% de la durée, soit en moyenne de 0 à environ 680 ms) un effet de la session (Session 1 : 2,66 cm/s vs. Session 2 : 2,76 cm/s ; $F(1, 1323) = 8,4$; $p < .01$) mais seulement une tendance sur l'effet de la stimulation (Placebo : 2,68 cm/s vs. rTMS : 2,74 cm/s ; $F(1, 1323) = 3,7$; $p = .054$). Un effet de la session était aussi présent sur la quatrième séquence (60-80% de la durée, environ de 2050 à 2730 ms)

(Session 1 : 2,14 cm/s vs. Session 2 : 2,19 cm/s ; $F(1, 1323) = 3,9$; $p < .05$) ainsi qu'une interaction entre les trois facteurs sur la deuxième séquence.

Synthèse des effets significatifs : Tâche de dictée, Groupe de stimulation GMFA

Effet de la longueur des mots (Courts vs. Longs)

- Vitesses plus lentes (-0,14 cm/s), distances plus longues (+3,20 cm) (sauf en prenant en le nombre de lettres), pression moyenne plus faible (-5,8 u.a.) pour les mots longs. Pas d'effet sur les latences en prenant en compte la durée acoustique du stimulus (+72 ms dans le cas contraire)

Effet de la régularité orthographique

- Latences plus longues pour les mots irréguliers uniquement longs (+77 ms). Effet d'irrégularité plus important en première session (+62 ms) par rapport à la seconde session (+28 ms).

- Distances plus longues (+0,53 cm, même à nombre de lettres égal : +0,40 cm) et taux d'erreurs plus important (+8,4 %) (en particulier pour les mots longs, +10,9 %) pour les mots irréguliers.

Effet de la session

- Réduction des latences (-90 ms), augmentation des vitesses (+0,02 cm/s), réduction des distances du tracé (-0,18 cm) et diminution de la pression (-17,2 u.a.) dans la seconde session par rapport à la première. Augmentation des vitesses principalement localisée temporellement sur les premiers 20% de la durée de production (+0,15 cm/s sur les mots courts et +0,10 cm/s sur les longs).

Effet de la stimulation rTMS (par rapport à la condition placebo)

- Augmentation des latences (+10 ms) (effet présent sur les mots longs : +17 ms, les mots irréguliers : +13 ms, et les mots longs irréguliers : +27ms), augmentation des vitesses (+0,03 cm/s, présente sur tous les types de mots sauf les réguliers) et diminution de la pression (-11,3 u.a., identique quel que soit le type de mot). Accélération localisée temporellement sur les premiers 20% de la durée de production (sur les mots courts : +0,17 cm/s ; tendance sur les longs +0,06 cm/s).

III.2. Tâche de Stroop à l'écrit

Des analyses statistiques ont été successivement conduites sur les latences, les vitesses moyennes d'écriture, les distances du tracé, et la pression moyenne. Les moyennes et écart-types des variables recueillies dans chaque condition et en fonction du type de stimulation sont présentées dans la Table IX-3 ci-après.

Table IX-3 : Valeurs moyennes (et écart-types) des différentes variables recueillies en fonction des différentes conditions dans la tâche d'écriture sous dictée.

	Placebo				rTMS (GMFA)			
	Dénomination		Copie		Dénomination		Copie	
	Congruent	Incongruent	Congruent	Incongruent	Congruent	Incongruent	Congruent	Incongruent
Latences (ms)	851 (218)	943 (205)	760 (174)	775 (186)	865 (206)	956 (217)	764 (213)	776 (210)
Vitesses (cm/s)	3,11 (0,7)	3,05 (0,8)	3,11 (0,7)	3,09 (0,7)	3,05 (0,8)	3,03 (0,8)	3,09 (0,8)	3,08 (0,8)
Distances (cm)	4,4 (1,4)	4,5 (1,5)	4,4 (1,6)	4,5 (1,6)	4,4 (1,5)	4,4 (1,5)	4,3 (1,5)	4,3 (1,5)
Pression (u.a.)	357 (155)	358 (164)	359 (156)	351 (150)	320 (122)	338 (138)	336 (138)	339 (143)

III.2.1. Latences d'écriture

Le jeu de données utilisé dans l'analyse des latences (16 sujets * 48 items * 2 sessions), après rejet de 4 erreurs (0,3 %) et 5 valeurs extrêmes (inférieures à 300 ms ou supérieures à 2000 ms, 0,3%), impliquait 1 479 valeurs (de plus, suite à un problème technique, la moitié des données d'un participant étaient manquantes). Au-delà des 4 effets fixes (i.e. Tâche, Congruence, Session, Stimulation) et du facteur aléatoire (i.e. Sujet) inclus dans le modèle, la pertinence de l'ajout de l'effet fixe Mot Ecrit (i.e. avec 3 conditions : « Vert », « Rouge », « Bleu ») a été testée via un test du rapport de vraisemblance. Le résultat de ce test n'étant pas significatif ($\chi^2 = 20,9$; $p = .93$), ce facteur n'a pas été retenu. Après conduction d'un premier modèle, 44 *outliers* (3,0 %) ont été exclus du modèle final.

Les effets du type de tâche (Dénomination Ecrite: 906 ms vs. Copie : 768 ms ; $F(1, 1405) = 377,1$; $p < .0001$), de congruence (Congruents : 810 ms vs. Incongruents : 863 ms ; $F(1, 1405) = 54,7$; $p < .0001$), de session (Session 1 : 877 ms vs. Session 2 : 796 ms ; $F(1, 1406) = 123,7$; $p < .0001$) étaient significatifs. Des interactions entre le type de tâche et la congruence ($F(1, 1405) = 32,6$; $p < .0001$) et entre le type de tâche et la session ($F(1, 1405) = 13,3$; $p < .001$) étaient présentes.

Les tests post-hoc ont montré que l'effet de l'incongruence était présent dans la tâche de dénomination écrite (+93 ms ; $T(1405) = 9,3$; $p < .0001$) mais absent dans la tâche de copie (+12 ms ; $T(1405) = 1,2$; $p = .23$). La diminution des temps de réaction entre la session 1 et la session 2 semblait ensuite plus importante dans la tâche de copie (-107 ms ; $T(1406) = 10,5$; $p < .0001$) que dans la tâche de dénomination Ecrite (-55 ms ; $T(1406) = 5,4$; $p < .0001$) (voir Figure IX-8).

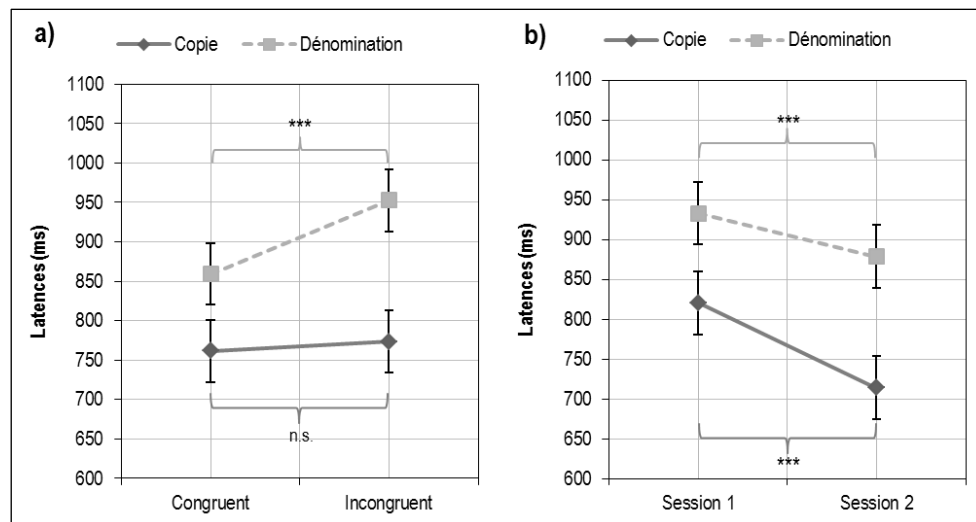


Figure IX-8 : a) Interaction entre le type de tâche et la congruence et b) interaction entre le type de tâche et la session sur les latences en Stroop à l'écrit. On constate un effet de l'incongruence présent uniquement en dénomination écrite (+93 ms), puis un effet de session sur les deux types de tâches (apparaissant plus important en tâche de copie). n.s. : non significatif, *** : $p < .0001$.

III.2.2. Vitesses moyennes d'écriture

Au-delà des 4 erreurs et des données manquantes évoquées précédemment, 4 vitesses moyennes d'écriture extrêmes ont été exclues d'une première analyse (supérieures à 6,0 cm/s ou inférieures à 1,5 cm/s ; représentant 0,3 % des essais corrects). L'inclusion dans le modèle du facteur Mot écrit permettant d'améliorer significativement la qualité de l'ajustement aux données ($\chi^2 = 191,3$; $p < .0001$), celui-ci a été maintenu dans l'analyse. L'identification des *outliers* de ce premier modèle a permis de rejeter 40 valeurs (2,7% des données restantes).

Les facteurs Session (Session 1 : 3,05 cm/s vs. Session 2 : 3,18 cm/s ; $F(1, 1378) = 65,0$; $p < .0001$) et Mot Écrit (Bleu : 3,25 cm/s vs. Rouge : 2,99 cm/s vs. Vert : 3,10 cm/s ; $F(1, 1378) = 89,7$; $p < .0001$) étaient significatifs. Une triple interaction, impliquant les facteurs de Stimulation, de Session et de type de tâche était présente ($F(1, 1378) = 4,9$; $p < .03$) mais les analyses post-hoc n'ont révélé aucun effet d'intérêt significatif.

III.2.3. Distance du tracé

Les valeurs extrêmes rejetées (supérieures à 10 cm ou inférieures à 2 cm) représentaient ici 0,7% des essais corrects. Là encore, un test de rapport de vraisemblance nous a incité à inclure le facteur Mot Écrit ($\chi^2 = 1140,3$; $p < .0001$), le mot écrit étant bien évidemment un déterminant crucial de la distance du tracé produit. 34 *outliers* (2,3%) étaient rejetés avant le calcul de modèle final.

Comme attendu la distance du tracé était significativement influencée par le facteur Mot Écrit (Bleu : 4,35 cm vs. Rouge : 5,15 cm vs. Vert : 3,82 cm ; $F(1, 1378) = 1005,7$; $p < .0001$). Une interaction de ce facteur avec la session était aussi présente $F(1, 1378) = 3,69$; $p < .03$). L'effet de la session était uniquement significatif sur le mot « bleu » lors des tests post-hoc (+0,11 cm. en Session 2 : $T(1378) = 2,65$; $p < .009$). La triple interaction entre les facteurs Stimulation, Session et Mot Écrit était aussi significative $F(1, 1378) = 123,1$; $p < .0001$) mais la visualisation des données suggère qu'elle repose en partie sur un biais lié aux différents styles d'écriture des deux groupes de sujets : plus grande amplitude dans la différence entre la distance d'écriture des trois mots pour un groupe de sujets par rapport à l'autre (l'interaction entre Stimulation et Session impliquant en effet une « dissociation » des sujets en deux groupes, cf. II.5.4 : Analyse des données).

III.2.4. Pression moyenne

Tous les essais corrects ont été inclus dans le calcul du premier modèle. Le facteur Mot Écrit permettait d'améliorer le modèle et a été inclus ($\chi^2 = 55,6$; $p < .0001$). Les *outliers* exclus représentaient ensuite 2,1 % du jeu de données.

Les effets des facteurs Mot Écrit (Bleu : 354,8 vs. Rouge : 336,6 vs. Vert : 352,9 ; $F(1, 1421) = 22,6$; $p < .0001$), Session (Session 1 : 353,5 vs. Session 2 : 342,7 ; $F(1, 1421) = 18,8$; $p < .0001$) et Stimulation (Placebo : 357,3 vs. rTMS : 338,9 ; $F(1, 1421) = 55,0$; $p < .0001$) étaient significatifs. L'interaction entre la Stimulation et la Congruence était significative ($F(1, 1421) = 6,30$; $p < .02$). Une tendance était présente sur l'interaction entre la Stimulation et la Tâche ($F(1, 1421) = 3,09$; $p = .079$).

L'analyse post-hoc de l'effet de la Stimulation au travers des différentes tâches et conditions a révélé que celui-ci était significatif dans toutes les conditions (Dénomination : -23 u.a., Copie : -14 u.a., condition Congruente : -25 u.a. et condition Incongruente : -12 u.a.) à l'exception de la condition incongruente en tâche de copie où seule une tendance était présente ($T(1421) = 1,87$; $p = .061$).

Synthèse des effets significatifs : Tâche de Stroop, Groupe de stimulation GMFA

Effet de la tâche (Copie vs. Dénomination)

- Latences plus longues en dénomination (+138 ms).

Effet de la congruence

- Augmentation des latences pour les essais incongruents uniquement en dénomination, (« effet Stroop » ; +93 ms).

Effet de la session

- Réduction des latences dans la session 2 (-81 ms) (plus importante en copie, -107 ms), augmentation de la vitesse (+0,13 cm/s) et diminution de la pression moyenne (-10,8 u.a.).

Effet de la stimulation rTMS (par rapport à la condition placebo)

- Diminution de la pression moyenne d'écriture (-18,4 u.a.). Effet présent en dénomination comme en copie, en condition congruente comme incongruente (à l'exception des incongruents en copie ; $p = .06$)

Effet du mot écrit

- Vitesse : Bleu >> Vert >> Rouge
- Distance : Rouge >> Bleu >> Vert
- Pression : Bleu = Vert >> Rouge

III.3. Tâche de barrage

L'objectif de cette tâche était de mettre en évidence d'éventuels effets de la stimulation rTMS sur la performance motrice, notamment par le biais d'un indice de latéralité (la stimulation étant effectuée uniquement sur l'hémisphère gauche, dominant chez des sujets droitiers). Le nombre de cases cochées (en 1 min) lors de la réalisation de la tâche avec la main droite puis avec la main gauche était donc relevé. Un simple ratio de latéralité est calculé suivant la formule suivante : $\{(n_D - n_G) / (n_D + n_G)\}$ (où n_D représente le nombre de cases cochées avec la main droite et n_G avec la main gauche). Un ratio positif est attendu chez des sujets droitiers.

Pour évaluer les effets respectifs de la Session et de la Stimulation sur cet indice (ainsi que sur n_D et n_G), des tests non paramétriques pour échantillons appariés ont été utilisés (test de Wilcoxon).

Le ratio de latéralité n'était pas différent entre la Session 1 et la Session 2 (+12,8 vs. +13,6 ; $p = .44$), ni entre la stimulation placebo et la rTMS active (+13,5 vs. +12,9 ; $p = .26$). Cependant, le nombre de cases cochées était en moyenne supérieur lors de la seconde session :

avec la main droite (165 vs. 179 ; $p < .001$) et avec la main gauche (129 vs. 137 ; $p < .009$). Aucune différence de ce type n'était présente entre la stimulation active et la stimulation placebo.

IV. DISCUSSION : GROUPE DE STIMULATION GMFA

Nous souhaitons dans cette expérimentation mettre en évidence les effets comportementaux résultant d'une stimulation rTMS 1 Hz (inhibitrice) de la GMFA. Les tâches utilisées et les variables recueillies visaient notamment à distinguer des effets centraux et des effets périphériques. Au-delà des éventuels effets de la stimulation, les analyses de ces variables comportementales ont démontré l'impact significatif sur le comportement de certains des facteurs manipulés qu'il convient de détailler dans un premier temps.

IV.1. Résultats comportementaux indépendamment de la stimulation

IV.1.1. Ecriture sous dictée

En écriture sous dictée, nous n'observons pas d'effet de la longueur des mots (deux ou trois syllabes) sur les latences (lorsque la durée acoustique du stimulus était prise en compte). Cela confirme ce que l'on observait lors de nos précédentes expérimentations ; l'absence d'un réel coût de programmation lié du nombre de lettres du mot à produire (les monosyllabiques, pas utilisés ici, auraient par contre un statut à part). On observe aussi une vitesse d'écriture moyenne plus lente dans les mots plus longs (cela était déjà le cas lors de notre première expérimentation du Chapitre V). Comme attendu, un effet de l'irrégularité était aussi présent, se manifestant par des erreurs orthographiques et des latences plus rallongées. Cet effet sur les latences semblait restreint aux mots de 3 syllabes mais puisque nous n'avions pas contrôlé avec précision la position de la séquence irrégulière dans le mot, il est difficile d'en dire davantage. On constate aussi de manière intéressante que ce coût de l'irrégularité était fortement atténué lors de la seconde session. Ce coût sur les latences résultant d'un conflit entre les voies phonologique et lexicale, on peut en déduire que la représentation lexicale orthographique du mot était davantage activée, ou récupérée plus rapidement, lors de la seconde présentation, résultant d'un effet d'amorçage. L'influence de la phonologie était ainsi amoindrie. Il ne s'agissait en effet pas d'une simple amélioration globale des performances, de la rapidité d'exécution et de réaction lors de la seconde réalisation de la tâche (que l'on observe en effet, que ce soit lors de la dictée ou de la tâche de Stroop), mais bien d'une réduction de l'écart entre mots réguliers et irréguliers.

IV.1.2. Tâche de Stroop à l'écrit

La tâche de Stroop à l'écrit a elle aussi fourni les résultats attendus puisque nous avons observé un fort effet sur les latences du type de tâche, la tâche de copie apparaissant plus automatisée que la tâche de dénomination. L'effet de la congruence entre la couleur de l'encre et le mot écrit était par ailleurs présent, et restreint à la tâche de dénomination. Aucun effet périphérique, sur la vitesse d'écriture du mot, ou sur la pression, n'était par contre démontré. Ceci suggère l'absence d'une répercussion en cascade du conflit central, le conflit entre le niveau sémantique (couleur de l'encre) et le niveau orthographique (mot écrit) est résolu lorsque la réponse est initialisée. Dans des tâches de dénomination écrite plus langagières (la tâche de Stroop impliquait de choisir uniquement parmi trois réponses prédéterminées) Roux et Bonin (2012) ont montré que les effets de facilitation qu'ils obtenaient en présence d'un distracteur ne relèveraient pas du niveau sémantique. Cela peut suggérer que le niveau sémantique (i.e. récupération de la couleur de l'encre) était trop distant dans la hiérarchie des niveaux de traitement pour avoir des effets sur les niveaux les plus périphériques. Nous avons vu dans le Chapitre V que des effets différents pouvaient être obtenus lorsque le conflit était situé « entre la phonologie et l'orthographe » (i.e. effet de l'irrégularité orthographique).

Nos participants étaient plus rapides (latences plus courtes et vitesses d'écriture plus élevée) lors de la seconde réalisation de la tâche de Stroop. Bien que cet effet fût significatif dans les deux tâches, il semble que ce soit surtout la tâche de copie qui ait bénéficié de cette amélioration des latences (interaction significative), alors qu'elle générait déjà des latences plus rapides que la dénomination de couleur. Si l'on considère que les deux tâches impliquaient la même programmation graphomotrice à partir d'une même représentation orthographique (les réponses étaient les mêmes dans les deux tâches), cela suggère que c'est la capacité à récupérer cette représentation orthographique à partir d'un mot lu (tâche de copie) qui était surtout accélérée lors de la seconde passation. Puisque nous n'avons pas utilisé de condition neutre (e.g. mot à copier présenté en noir), on ne peut déterminer s'il s'agissait d'une réduction d'une éventuelle influence perturbatrice de la couleur (mieux inhibée en seconde session). On peut aussi avancer une autre hypothèse selon laquelle les performances en dénomination seraient moins facilement améliorées en raison de temps de traitements (pour récupérer la représentation orthographique à partir d'une représentation sémantique) incompressibles (effet plancher).

IV.2. Effets comportementaux de la stimulation de la GMFA

IV.2.1. Un effet sur la programmation des mots longs ?

Les effets de la stimulation de la GMFA par rapport à la condition placebo sur les différentes variables comportementales recueillies dans ces tâches apparaissaient plutôt ténus. L'important effet d'apprentissage (« test - retest ») explique en partie notre difficulté à isoler l'effet réel de la stimulation sur les latences ; tous les sujets étant plus rapides lors de la seconde session, qu'ils aient commencé par la stimulation réelle et ensuite subi la stimulation placebo ou l'inverse. On constate tout d'abord des latences significativement plus longues (bien que la différence fût de faible amplitude, 10 ms une fois les moyennes ajustées pour toutes les variables incluant la durée acoustique du stimulus et l'effet test-retest) dans la tâche d'écriture sous dictée en condition de stimulation réelle par rapport à la stimulation placebo. Des analyses complémentaires ont montré que cet effet était particulièrement présent sur les mots longs et irréguliers (+27 ms, il était de +17ms sur l'ensemble des mots longs). L'effet sur les mots longs était attendu dans le cadre de l'hypothèse d'un rôle de mémoire de travail orthographique de cette aire puisque sa sensibilité à la longueur des mots avait été rapportée en IRMf (Rapp & Dufor, 2011). Plutôt qu'un seul effet sur les latences, nous aurions en réalité aussi pu prévoir une augmentation du taux d'erreur sur les mots plus longs, telle que l'on peut la rencontrer chez certains patients affectés par le syndrome du buffer graphémique. Une diminution de la vitesse du tracé ou de la pression restreinte aux mots longs aurait elle aussi pu traduire une difficulté à transcoder les différents graphèmes stockés dans le buffer graphémique en schèmes moteurs pendant l'exécution. L'absence d'effet de longueur orthographique en général sur les latences suggérait en effet que ces étapes périphériques survenaient de manière parallèle ; les allographes de la fin d'un mot long ne sont pas nécessairement activés/programmés lors de l'initialisation de la réponse. La planification était d'étendue réduite (e.g. les 5-6 premiers graphèmes, qui composaient nos mots courts) pour permettre les latences les plus rapides possibles. Ainsi nous pouvons proposer que l'augmentation des latences lors de la stimulation de la GMFA résulte d'une perturbation de l'interface entre le buffer graphémique et les étapes périphériques de la réponse, celles-ci devaient ainsi être davantage planifiées à l'avance (en particulier lorsque le mot dépassait 5-6 graphèmes).

Que l'effet fût plus important, voire restreint aux mots longs irréguliers est plus étonnant. Ces mots étaient en fait ceux générant les latences les plus longues, et les taux d'erreur les plus importants, même lors de la stimulation placebo. Il semble que la rTMS ait ainsi amplifié cet effet. Il est pourtant difficile de déterminer si cela relève réellement d'un effet de niveau central (e.g. la voie phonologique exerce son influence plus longtemps), un effet lié à la

saturation de la mémoire de travail (sur les items les plus « cognitivement coûteux » ; cf. modèle de Van Galen, 1991), ou de la nature ou la fréquence des graphèmes, bigrammes ou trigrammes présents dans les mots irréguliers (plus ou moins « coûteux » à programmer). En outre, l'analyse des distances du tracé a révélé que les mots irréguliers que nous avons utilisés étaient constitués d'un tracé graphique simplement plus long (7,4 cm contre 7,9 cm), même lorsque le nombre de lettres était contrôlé. L'effet de la stimulation sur les latences pourrait donc dépendre de la longueur du tracé graphique à programmer, au niveau périphérique de la programmation graphique de sortie (rôle proposé pour l'aire d'Exner dans le modèle de Roeltgen, 2003). L'absence globale d'effet sur les performances à la tâche de Stroop ne plaide en effet pas en faveur d'une difficulté accrue dans la gestion d'un conflit de niveau central après la stimulation de la GMFA.

IV.2.2. Un effet sensori-moteur

On note aussi la présence d'autres effets moins spécifiques consécutifs à la stimulation de la GMFA ; en particulier une diminution de la pression moyenne d'écriture, quels que soient les mots, en écriture sous dictée comme lors de la tâche de Stroop. Ce phénomène de nature très périphérique, s'explique peut-être par un effet indirect de la stimulation. L'aire prémotrice ciblée était à la fois très proche et très interconnectée anatomiquement avec l'aire motrice primaire (M1). Des effets physiologiques « à distance » de la rTMS ont en effet plusieurs fois été démontrés, notamment lors de stimulations prémotrices (Bestmann, Baudewig, Siebner, Rothwell, & Frahm, 2005; Bestmann et al., 2008). L'inhibition de la GMFA par la rTMS a ainsi pu provoquer une réduction sensible de l'excitabilité corticale du cortex primaire se traduisant par une légère, mais détectable, diminution de la force manuelle exercée (le cortex moteur est connu pour coder la force du mouvement ; Georgopoulos, Ashe, Smyrnis, & Taira, 1992), mais insuffisante pour affecter la rapidité du geste en général (la tâche de barrage n'était pas significativement affectée). Pourtant, nous manquons de données pour expliquer ce que des variations de la pression exercée par le stylo lors de l'écriture manuscrite révèlent des processus sous-jacents. Dans une revue visant à identifier les déterminants de ce type de variable, van Drempt, McCluskey, et Lannin (2011) ont rapporté qu'une augmentation de la pression pouvait résulter de l'augmentation de la complexité de la tâche, ou augmentait simplement tout au long de la tâche (nos données démontrent en effet une pression en moyenne plus faible lorsque le mot était plus long, et lors de la seconde réalisation de la tâche), ou lorsque l'écriture était plus rapide, mais ces données provenaient d'un nombre restreint de travaux et pas d'observations systématiques et contrôlées.

La vitesse d'écriture des mots était aussi sensiblement (mais significativement) plus élevée après la stimulation. Bien que l'interaction avec la régularité n'apparaissait pas significative, cet effet semblait surtout concerner les mots irréguliers. Le fait qu'il s'agisse d'une accélération plutôt qu'un ralentissement et que cette accélération semblait localisée au début de chaque production (surtout sur les mots courts, l'effet était moins visible sur les mots longs car les 20% de la durée correspondaient à une durée réelle plus longue) nous incite plutôt à y voir un effet périphérique, peut-être en lien avec le décalage dans les latences : la production est débutée légèrement plus tardivement mais le premier geste effectué est plus brusque. Cet effet sur la vitesse est ainsi peut-être à relier à l'impact sensori-moteur sur la pression d'écriture que nous venons d'évoquer. Bien qu'aucune corrélation significative entre ces deux variables n'apparaissait dans nos données (Pearson $r = 0.14$, $p = .058$), des relations entre pression exercée par le stylo et vitesse du geste d'écriture ont déjà été rapportées (Wann & Nimmo-Smith, 1991).

IV.3. Conclusion

En résumé, la stimulation de la GMFA n'a pas affecté les processus centraux impliqués dans la réalisation de la tâche de Stroop à l'écrit. On y observe clairement des effets d'automatisme (la copie est plus automatique que la dénomination qui nécessite l'accès à la représentation sémantique de la couleur) et de congruence en dénomination (délai lié à la résolution du conflit entre les représentations lexicales issue de la lecture du mot et issue de l'identification de la couleur du mot) identiques lors des stimulations réelle et placebo. L'effet de régularité orthographique en dictée, présent sur les latences, n'apparaissait pas non plus globalement affecté. Au-delà d'un effet moteur global, sur la pression exercée par le stylo ou sur la vitesse d'écriture, c'est donc essentiellement le délai de programmation des mots longs, particulièrement lorsqu'irréguliers, qui était affecté. Cela plaide donc d'abord plutôt en faveur de l'implication de la GMFA dans les opérations de maintien en mémoire à court terme des informations orthographiques, bien que les effets fussent trop faibles et trop limités pour conclure définitivement. L'effet attendu était en effet supposé dépendre strictement du nombre de graphèmes à produire (mémoire de travail graphémique), indépendamment de la fréquence lexicale ou de la régularité orthographique du mot. On peut ainsi proposer une hypothèse alternative selon laquelle l'effet observé ne dépendait pas du nombre de graphèmes à produire (buffer graphémique) mais de la longueur du tracé, du geste moteur à programmer (« buffer graphomoteur »). L'effet de l'irrégularité ayant pu être confondu avec des distances du tracé plus longues. Cela expliquerait pourquoi aucune activation de la GMFA n'était visible lors de notre tâche d'épellation orale en IRMf. Quoi qu'il en soit, on peut supposer que l'impact de la

stimulation rTMS était ici trop limité pour permettre de faire émerger des effets importants dans une tâche aussi simple ne nécessitant pas une grande flexibilité (seuls les mots présentant le plus fort taux d'erreurs et les temps de réactions les plus longs étaient réellement impactés). Des tâches plus complexes, ne serait-ce que la production de phrases, de manière plus soutenue et continue, reposent probablement davantage sur l'intégrité d'une aire comme la GMFA, que son rôle soit celui d'une interface entre les processus centraux et périphériques de l'écriture ou qu'elle intervienne à un niveau plus périphérique.

V. RESULTATS : GROUPE DE STIMULATION CPS

V.1. Ecriture sous dictée

Comme précédemment des analyses statistiques ont été successivement conduites sur les taux d'erreur, les latences, les vitesses moyennes d'écriture, les distances du tracé, la pression moyenne puis les vitesses par portion de durée. Les moyennes et écart-types des variables recueillies dans chaque condition et en fonction du type de stimulation sont présentées dans la Table IX-4 ci-après.

Table IX-4 : Valeurs moyennes (et écart-types) des différentes variables recueillies en fonction des différentes conditions dans la tâche d'écriture sous dictée.

	Placebo				rTMS (CPS)			
	Courts		Longs		Courts		Longs	
	Réguliers	Irréguliers	Réguliers	Irréguliers	Réguliers	Irréguliers	Réguliers	Irréguliers
Taux d'erreur (%)	3,4 (0,9)	9,1 (2,1)	2,1 (0,8)	10,4 (2,6)	2,3 (0,8)	9,6 (2,5)	1,3 (0,9)	10,4 (2,9)
Latences (ms)	796 (174)	817 (189)	824 (180)	917 (212)	784 (155)	804 (176)	808 (165)	908 (200)
Vitesses (cm/s)	3,11 (0,7)	3,05 (0,8)	2,98 (0,7)	2,93 (0,7)	3,08 (0,8)	3,12 (0,8)	2,97 (0,8)	2,93 (0,7)
Distances (cm)	6,0 (1,9)	6,3 (1,8)	9,0 (2,6)	9,7 (2,6)	5,9 (1,8)	6,3 (1,8)	8,9 (2,5)	9,6 (2,7)
Pression (u.a.)	336 (114)	336 (114)	332 (110)	332 (112)	339 (122)	349 (121)	334 (117)	339 (117)

V.1.1. Taux d'erreurs

L'analyse des taux d'erreurs a été conduite avec la même méthode que pour le premier groupe de stimulation. Les résultats obtenus montraient uniquement des taux d'erreurs significativement supérieurs pour les mots irréguliers (9,9%) par rapport aux mots réguliers (2,3%) ($F(1, 98) = 62,5$; $p < .0001$).

V.1.2. Latences d'écriture

Après suppression des essais échoués (6,1 %) et des latences extrêmes (0,8 % ; les bornes utilisées étaient les mêmes que dans l'analyse du premier groupe de stimulation), l'analyse portait sur 2 862 latences. Les *outliers* identifiés après le calcul du premier modèle et exclus du modèle final représentaient 2,8% du jeu de données restant. L'inclusion du facteur Durée acoustique permettait d'améliorer l'ajustement (comparaison par rapport au modèle ne l'incluant pas : $\chi^2 = 24,37$; $p < .0001$).

Les effets principaux de durée acoustique ($F(1, 91) = 34,5$; $p < .0001$), de Régularité (Régulier : 807 ms vs. Irrégulier : 871 ms ; $F(1, 91) = 31,4$; $p < .0001$) et de Session (Session 1 : 887 ms vs. Session 2 : 792 ms ; $F(1, 2662) = 434,3$; $p < .0001$) étaient significatifs. L'effet de la stimulation affichait une tendance non significative (rTMS : 835 ms vs. Placebo : 843 ms ; $F(1, 2664) = 3,31$; $p = .069$). L'effet de Longueur n'était pas significatif (-15 ms pour les mots longs ; $p = .39$, contre +63 ms, $p < .0001$, lorsque la durée acoustique n'était pas incluse dans le modèle).

Des interactions significatives entre Régularité et Longueur ($F(1, 91) = 11,7$; $p < .0001$) et entre Régularité et Session ($F(1, 2664) = 10,9$; $p < .0001$) étaient aussi présentes.

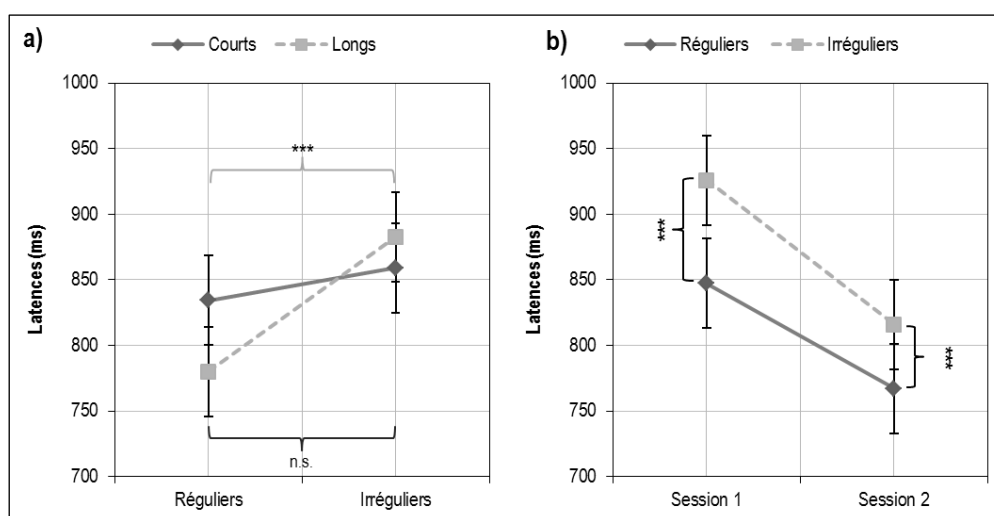


Figure IX-9 : a) Interaction entre la régularité et la longueur et b) interaction entre la régularité et la session sur les latences en production écrite sous dictée. On constate un impact négatif de l'irrégularité uniquement sur les mots longs (+103 ms), puis au-delà d'un important effet de Session, un impact négatif de l'irrégularité plus important en Session 1 (+79 ms, contre +49 ms en Session 2). n.s. : non significatif, * : $p < .01$, *** : $p < .0001$.

L'interaction entre Longueur et Régularité révélait ainsi un effet négatif de l'irrégularité sur les latences uniquement sur les mots longs (réguliers : 780 ms vs. irréguliers : 883 ms ; $T(91) = 6,38$; $p < .0001$) (voir Figure IX-9 a)). Outre l'important effet de la session, l'interaction entre

la Session et la Régularité, suggérait un effet de Régularité, bien que significatif dans les deux cas, plus important en Session 1 (réguliers : 847 ms vs. irréguliers : 925 ms ; $T(124) = 6,41$; $p < .0001$), qu'en Session 2 (réguliers : 767 ms vs. irréguliers : 816 ms ; $T(121) = 3,98$; $p < .0002$) (voir Figure IX-9 b)).

L'analyse post-hoc conduite pour tester l'effet de la stimulation ($p = .066$) selon les différentes catégories de mots (courts ou longs, réguliers ou irréguliers) n'a pas révélé d'effet significatif (seulement une tendance sur les mots réguliers : - 11 ms, $T(2663) = 1,76$; $p = .078$).

V.1.3. Vitesses moyennes d'écriture

Le jeu de données utilisé dans l'analyse des vitesses moyenne d'écriture par mot comprenait 2 864 valeurs : après suppression des essais échoués (6,1%) et des valeurs extrêmes (0,7 %). Les *outliers* exclus par la suite représentaient 2,3 % des données restantes.

Seuls les effets simples de Longueur (Courts : 3,12 cm/s vs. Longs : 2,96 cm/s ; $F(1, 92) = 10,5$; $p < .002$), et de Session (Session 1 : 3,07 cm/s vs. Session 2 : 3,00 cm/s ; $F(1, 2674) = 40,4$; $p < .0001$) étaient significatifs.

V.1.4. Distance du tracé

L'analyse des distances du tracé par mot était conduite sur 2 874 valeurs (suppression des erreurs et de 0,4% de valeurs extrêmes). 2,2% d'*outliers* étaient ensuite exclus du modèle final.

Les effets de Longueur (Courts : 6,2 cm vs. Longs : 9,4 cm ; $F(1, 92) = 255,9$; $p < .0001$), de Régularité (Réguliers : 7,6 cm vs. Irréguliers : 8,1 cm ; $F(1, 92) = 7,1$; $p < .009$) et de Session (Session 1 : 8,0 cm vs. Session 2 : 7,7 cm ; $F(1, 2690) = 89,0$; $p < .0001$) étaient significatifs. Une tendance non significative sur l'effet de la stimulation était aussi présente (rTMS : 7,79 cm vs. Placebo : 7,85 cm ; $F(1, 2690) = 3,1$; $p = .077$).

Comme précédemment, un modèle incluant la covariable « Nombre de lettres » a été testé, et permettait d'améliorer la qualité de l'ajustement ($\chi^2 = 63,7$; $p < .0001$). L'effet de cette variable était naturellement significatif ($F(1, 91) = 83,4$; $p < .0001$), au détriment de celui du facteur Longueur ($F(1, 91) = 0,5$; $p = .46$). Les autres effets n'étaient cependant pas modifiés et restaient présents, de même que la tendance sur l'effet de la Stimulation ($F(1, 2690) = 3,09$; $p = .079$).

V.1.5. Pression moyenne

L'analyse des pressions moyennes d'écriture dans chaque essai portait sur 2 885 valeurs dont en ensuite été exclus 1,9 % d'*outliers*.

Les effets de Longueur (Courts : 340,8 vs. Longs : 333,9 ; $F(1, 94) = 7,71$; $p < .007$), de Session (Session 1 : 342,6 vs. Session 2 : 332,2 ; $F(1, 2714) = 36,1$; $p < .0001$) et de Stimulation (Placebo : 334,7 vs. rTMS : 340,0 ; $F(1, 2714) = 9,35$; $p < .003$) étaient significatifs. On notait aussi la présence d'une interaction entre la régularité, la session et la stimulation ($F(1, 2718) = 7,57$; $p < .006$), ainsi qu'une tendance non significative entre la régularité et la stimulation ($F(1, 2614) = 3,76$; $p = .053$).

Une analyse post-hoc de l'effet significatif de Stimulation au travers des différentes catégories de mots (i.e. facteurs Longueur et Régularité) a révélé que celui-ci était présent sur les mots courts irréguliers (+10,7 u.a., $T(2712) = 3,03$; $p < .003$) et de manière tendancielle sur les mots longs irréguliers (+6,6 u.a., $T(2714) = 1,86$; $p = .063$) (présent sur les irréguliers, $p < .0006$, mais absent sur les mots réguliers $p < .42$).

V.1.6. Vitesses par portion de durée

Bien qu'aucun effet de la stimulation sur la vitesse moyenne d'écriture par mot n'ait été observé, des analyses ont été conduites sur les vitesses moyennes de chacune des 5 portions de durée (i.e. séquences 0-20%, 20-40%, 40-60%, 60-80% et 80-100% de la durée), pour les mots courts, puis pour les mots longs.

Concernant les mots courts, on observait un effet de la session sur les séquences 3 et 4 ($F(1, 1337) = 4,2$; $p < .05$ et $F(1, 1343) = 6,2$; $p < .02$) et une interaction entre Régularité et Session sur la séquence 2 ($F(1, 1345) = 5,6$; $p < .02$).

Concernant les mots longs, seuls un effet de la Session (séquence 2 : $F(1, 1339) = 5,9$; $p < .02$) et une interaction Session x Régularité étaient mis en évidence (séquence 3 : $F(1, 1335) = 7,2$; $p < .008$).

Synthèse des effets significatifs : Tâche de dictée, Groupe de stimulation CPS

Effet de la longueur des mots (Courts vs. Longs)

- Vitesses plus lentes (-0,16 cm/s), pression moyenne plus faible (-6,8 u.a.) et distances plus longues (+3,21 cm) (sauf en prenant en le nombre de lettres) pour les mots longs. Pas d'effet sur les latences (sauf dans un modèle ne prenant pas en compte la durée acoustique du stimulus).

Effet de la régularité orthographique

- Latences plus longues pour les mots irréguliers uniquement longs (+103 ms). Effet de l'irrégularité plus important en première (+79 ms) qu'en seconde session (+49 ms).

- Distances plus longues (+0,54 cm, même à nombre de lettres égal : +0,41 cm) et taux d'erreurs plus important (+7,6 %) pour les mots irréguliers.

Effet de la session

- Réduction des latences (-95 ms), augmentation des vitesses (+0,07 cm/s), diminution de la pression (-10,4 u.a.) et réduction des distances du tracé (-0,30 cm) dans la seconde session.

Effet de la stimulation rTMS (par rapport à la condition placebo)

- Augmentation de la pression moyenne pour les mots irréguliers (+10,7 u.a. si courts, +6,6 u.a. si longs). Tendance à la diminution des latences (-8 ms) et à la diminution de la distance du tracé (-0,06 cm).

V.2. Tâche de Stroop à l'écrit

Comme précédemment les analyses statistiques ont été successivement conduites sur les latences, les vitesses moyennes d'écriture, les distances du tracé, et la pression moyenne. Les moyennes et écart-types des variables recueillies dans chaque condition et en fonction du type de stimulation sont présentées dans la Table IX-5 ci-après.

Table IX-5 : Valeurs moyennes (et écart-types) des différentes variables recueillies en fonction des différentes conditions dans la tâche de Stroop à l'écrit.

	Placebo				rTMS (CPS)			
	Dénomination		Copie		Dénomination		Copie	
	Congruent	Incongruent	Congruent	Incongruent	Congruent	Incongruent	Congruent	Incongruent
Latences (ms)	912 (239)	977 (246)	814 (236)	841 (212)	876 (232)	941 (214)	804 (225)	826 (235)
Vitesses (cm/s)	3,37 (0,8)	3,42 (0,9)	3,47 (0,8)	3,41 (0,8)	3,34 (0,8)	3,36 (0,9)	3,41 (0,9)	3,39 (0,9)
Distances (cm)	4,29 (1,21)	4,47 (1,38)	4,54 (1,34)	4,53 (1,39)	4,32 (1,28)	4,51 (1,44)	4,34 (1,28)	4,38 (1,29)
Pression (u.a.)	351 (146)	353 (139)	354 (146)	351 (141)	346 (134)	351 (139)	358 (134)	359 (140)

V.2.1. Latences d'écriture

5 erreurs (0,3 %) ont été identifiées sur l'ensemble du jeu de données. Après suppression des valeurs extrêmes (0,5 %) l'analyse statistique a été conduite sur 1 522 latences. Le modèle utilisé incluait les effets fixes de Tâche, de Congruence, de Session et de Stimulation, ainsi que le facteur aléatoire Sujet. Le facteur Mot Ecrit ne permettant pas d'améliorer l'ajustement du modèle ($\chi^2 = 38,4$; $p = .20$), celui-ci n'a pas été inclus. 32 outliers (2,1 %) étaient ensuite exclus du modèle final.

Les effets du type de tâche (Dénomination Ecrite: 931 ms vs. Copie : 821 ms ; $F(1, 1460) = 185,8$; $p < .0001$), de Congruence (Congruents : 853 ms vs. Incongruents : 900 ms ; $F(1, 1460) = 33,3$; $p < .0001$), de Session (Session 1 : 894 ms vs. Session 2 : 858 ms ; $F(1, 1460) = 19,8$; $p < .0001$) et de Stimulation (rTMS : 863 ms vs. Placebo : 889 ms ; $F(1, 1460) = 10,6$; $p < .002$) étaient significatifs.

Une interaction entre le type de tâche et la congruence était présente ($F(1, 1460) = 6,0$; $p < .02$), avec un effet de l'incongruence significatif dans la tâche de dénomination écrite (+66 ms ; $T(1460) = 5,79$; $p < .0001$) mais plus faible dans la tâche de copie (+27 ms ; $T(1405) = 2,36$; $p < .02$) (voir Figure IX-10 a). Des interactions non significatives étaient aussi présentes entre la tâche et la Session ($F(1, 1460) = 3,4$; $p = .065$) et entre la tâche et la Stimulation ($F(1, 1460) = 3,7$; $p = .053$).

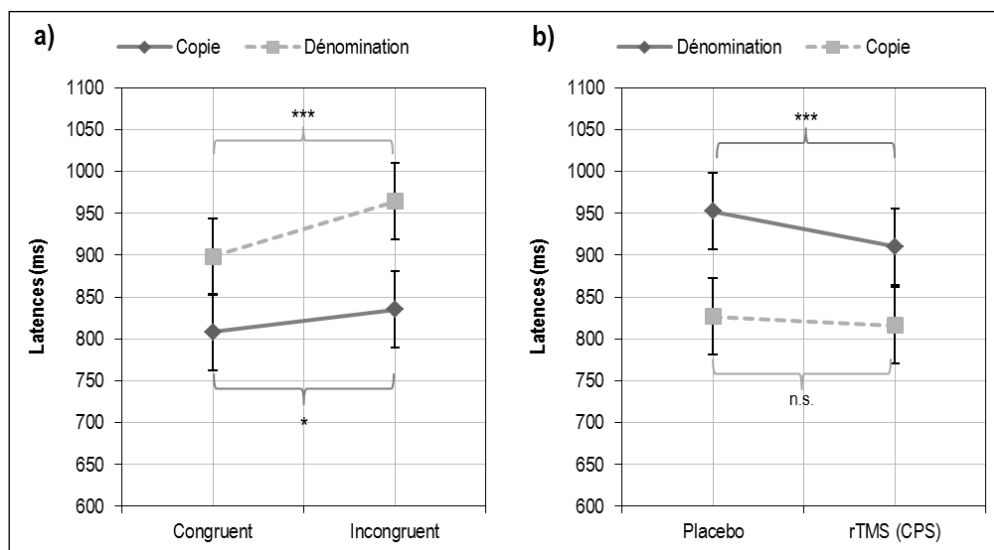


Figure IX-10 : a) Interaction entre la Tâche et la Congruence ($p < .0001$) et b) interaction (non significative) entre la Tâche et la Stimulation ($p = .053$) sur les latences en Stroop à l'écrit. On constate un effet de l'incongruence (+66 ms) et un effet de la stimulation (-42 ms) surtout présents en dénomination écrite. n.s. : non significatif, * : $p < .05$, * : $p < .0001$.**

L'analyse post-hoc de l'effet de la Stimulation au travers des différentes tâches et conditions a révélé que celui-ci était significatif dans la tâche de dénomination (-42 ms ; $T(1460) = 3,65$; $p < .0003$) (conditions Congruente : $p < .009$, et Incongruente : $p < .02$) mais pas dans la tâche de copie (-11 ms ; $T(1460) = 0,94$; $p = .35$) (voir Figure IX-10 b)).

V.2.2. Vitesses moyennes d'écriture

Le calcul du modèle était conduit sur 1 508 vitesses moyennes (exclusion de 1,4 % de valeurs extrêmes). Le facteur Mot Ecrit était inclus dans cette analyse (amélioration de l'ajustement par rapport au modèle sans ce facteur : $\chi^2 = 169,0$; $p < .0001$). 33 *outliers* (2,2 %) étaient ensuite rejetés.

Les facteurs Tâche (Dénomination Ecrite: 3,40 cm/s vs. Copie : 3,44 cm/s ; $F(1, 1413) = 4,36$; $p < .04$), Mot Ecrit (Bleu : 3,56 cm/s vs. Vert : 3,41 cm/s vs. Rouge : 3,28 cm/s ; $F(1, 1413) = 90,7$; $p < .0001$), Session (Session 1 : 3,46 cm/s vs. Session 2 : 3,38 cm/s ; $F(1, 1413) = 22,5$; $p < .0001$) et Stimulation (rTMS : 3,40 cm/s vs. Placebo : 3,44 cm/s ; $F(1, 1413) = 4,61$; $p < .04$) étaient significatifs.

Des interactions étaient aussi présentes entre la Tâche et la Session ($F(1, 1413) = 4,49$; $p < .04$) et entre la Congruence et le Mot Ecrit ($F(1, 1413) = 7,74$; $p < .001$), ainsi qu'une triple interaction entre Mot Ecrit, Stimulation et Session ($F(1, 1413) = 12,3$; $p < .0001$).

La diminution de la vitesse d'écriture observée sur la seconde session par rapport à la première était ainsi visible lors de la dénomination (-0,12 cm/s ; $T(1413) = 4,83$; $p < .0001$) mais pas lors de la copie (-0,04 cm/s ; $T(1413) = 1,87$; $p = .062$). L'effet de l'incongruence était significatif uniquement sur l'écriture du mot « vert » ($T(1413) = 3,74$; $p < .003$).

L'analyse post-hoc de l'effet de la Stimulation au travers des différentes tâches et conditions n'a pas révélé d'effet significatif.

V.2.3. Distance du tracé

1 526 mesures de distance étaient incluses dans le calcul du modèle initial (suppression des erreurs et de 0,3 % de valeurs extrêmes). Le facteur Mot Ecrit était conservé ($\chi^2 = 1515$; $p < .0001$). 40 *outliers* (2,6 %) étaient rejetés avant le calcul de modèle final.

Les facteurs Congruence (Congruents: 4,46 cm vs. Incongruents : 4,51 cm ; $F(1, 1424) = 5,7$; $p < .05$), Mot Ecrit (Bleu : 4,23 cm vs. Vert : 3,90 cm vs. Rouge : 5,32 cm ; $F(1, 1424) =$

1442,9 ; $p < .0001$), Session (Session 1 : 4,55 cm vs. Session 2 : 4,41 cm ; $F(1, 1424) = 39,4$; $p < .0001$) et Stimulation (rTMS : 4,46 cm vs. Placebo : 4,51 cm ;) $F(1, 1424) = 6,7$; $p < .01$) étaient significatifs.

Des interactions entre Tâche et Congruence ($F(1, 1424) = 3,86$; $p < .05$), Tâche et Stimulation ($F(1, 1424) = 11,4$; $p < .001$), Tâche et Session ($F(1, 1424) = 4,96$; $p < .03$) ou encore entre Congruence et Mot écrit ($F(1, 1424) = 3,16$; $p < .05$) étaient présentes, ainsi que deux triples interactions (Tâche x Stimulation x Mot écrit ; $F(1, 1424) = 3,14$; $p < .05$ et Session x Stimulation x Mot écrit ; $F(1, 1424) = 120,8$; $p < .0001$).

Ainsi, parmi les effets mis en évidence dans les tests post-hoc, l'augmentation sensible de la distance du tracé en condition incongruente était visible en dénomination (+0,10 cm ; $T(1424) = 3,06$; $p < .003$) mais pas en copie (+0,01 cm ; $T(1424) = 0,30$; $p = .76$), sur l'écriture du mot « rouge » (+0,13 cm ; $T(1424) = 3,36$; $p < .0009$) mais pas du mot « vert » (+0,03 cm ; $T(1424) = 0,66$; $p = .51$) ni du mot « bleu » (+0,00 cm ; $T(1424) = 0,06$; $p = .95$). La réduction de la distance en seconde session était plus importante en copie (-0,19 cm ; $T(1424) = 6,05$; $p < .0001$) qu'en dénomination (-0,10 cm ; $T(1424) = 2,85$; $p < .005$).

L'analyse testant l'effet significatif de la Stimulation au travers des différentes tâches et conditions a montré une diminution significative de la distance en condition rTMS par rapport à la condition placebo en copie (-0,13 cm ; $T(1424) = 4,24$; $p < .0001$) mais pas en dénomination (+0,02 cm ; $T(1424) = 0,55$; $p = .58$).

V.2.4. Pression moyenne

Tous les essais corrects ont été inclus dans le calcul du premier modèle. Le facteur Mot Ecrit permettait d'améliorer le modèle et a été inclus ($\chi^2 = 62,6$; $p < .0001$). Les *outliers* exclus représentaient ensuite 1,8 % des données.

Les effets des facteurs Mot Ecrit (Bleu : 367,3 vs. Rouge : 350,3 vs. Vert : 344,0 ; $F(1, 1470) = 34,2$; $p < .0001$) et Session (Session 1 : 353,5 vs. Session 2 : 342,7 ; $F(1, 1470) = 26,3$; $p < .0001$) étaient significatifs.

Une interaction non significative était présente entre la Congruence et la Stimulation ($F(1, 1470) = 3,16$; $p = .08$).

Synthèse des effets significatifs : Tâche de Stroop, Groupe de stimulation CPS

Effet de la tâche (Copie vs. Dénomination)

- Latences plus longues en dénomination (+110 ms) et vitesse légèrement plus lente (-0,04 cm/s).

Effet de la congruence

- Augmentation des latences pour les essais incongruents (en dénomination : +66 ms, et de manière moins importante en copie : +27ms). Augmentation de la distance du tracé uniquement en dénomination, (+0,10 cm). Le mot « vert » était écrit plus rapidement en condition d'incongruence (+0,11 cm/s) et le mot « rouge » plus grand (+0,13 cm)

Effet de la session

- Réduction des latences dans la session 2 (-36 ms, plus importante en copie qu'en dénomination), diminution de la vitesse (-0,08 cm/s) (uniquement en dénomination ; -0,12 cm/s), réduction de la distance (-0,14 cm), et diminution de la pression (-12,2 u.a.).

Effet de la stimulation rTMS (par rapport à la condition placebo)

- Réduction des latences (-26 ms) (effet uniquement présent en dénomination, -42 ms), ralentissement de la vitesse (-0,04 cm/s) et diminution de la distance (-0,05 cm) (mais, pour la distance, effet uniquement en copie, -0,13 cm).

Effet du mot écrit

- Vitesse : Bleu >> Vert >> Rouge
- Distance : Rouge >> Bleu >> Vert
- Pression : Bleu >> Rouge = Vert

V.3. Tâche de barrage

Comme précédemment, nous avons utilisé des tests non paramétriques pour échantillons appariés (test de Wilcoxon) pour tester les effets de Session et de Stimulation sur le ratio de latéralité calculé à cette tâche (ainsi que sur le nombre de cases cochées avec chaque main).

Le ratio de latéralité n'était pas significativement différent entre la Session 1 et la Session 2 (+15,5 vs. +16,0 ; $p = .46$), ni entre la stimulation placebo et la rTMS active, bien qu'une tendance apparaisse (+14,2 vs. +17,3 ; $p = .09$). Le nombre de cases cochées était en moyenne plus important lors de la seconde session : avec la main droite (154 vs. 170 ; $p < .001$) et avec la main gauche (114 vs. 126 ; $p < .004$). La stimulation n'avait pas d'effet significatif sur le nombre de cases cochées avec la main droite ou avec la main gauche (la différence sur le ratio résultait d'une légère augmentation pour la main droite et une légère diminution pour la main gauche après la stimulation réelle).

VI. DISCUSSION : GROUPE DE STIMULATION CPS

VI.1. Résultats comportementaux indépendamment de la stimulation

Les effets comportementaux obtenus lors de la tâche de dictée, indépendamment de l'effet de la stimulation, étaient cependant assez conformes à ceux décrits dans le groupe précédent. Les mots longs ne généraient pas de latences plus longues (lorsque la durée acoustique du stimulus était prise en compte dans le modèle), mais des vitesses d'écritures plus lentes et une pression plus faible. Les mots irréguliers provoquaient davantage d'erreurs ainsi que des latences plus longues uniquement sur les mots longs. Là encore, l'effet de l'irrégularité était atténué en seconde session. Il est aussi confirmé que le tracé composant les mots irréguliers était plus long que celui des mots réguliers. L'effet « test-retest » est aussi visible ; les latences étaient plus courtes et les vitesses d'écriture sensiblement plus élevées lors de la seconde réalisation de la tâche. On note aussi une diminution de la distance (les participants écrivaient « plus petit » la seconde fois) et de la pression (ces deux effets étaient aussi présents dans le groupe précédent).

Dans la tâche de Stroop à l'écrit, les effets d'« automaticité » (latences plus longues dans la tâche de dénomination par rapport à la tâche de copie) et de congruence (latences plus longues pour les essais incongruents, particulièrement en dénomination) étaient là encore présents. Certains effets de nature périphérique de l'incongruence étaient aussi visibles, sur la vitesse ou la distance du tracé, mais ils étaient trop limités (e.g. uniquement sur l'écriture du mot « vert ») pour que l'on soit en mesure conclure à une réelle répercussion en cascade du conflit central.

VI.2. Effets comportementaux de la stimulation du CPS

La stimulation rTMS du cortex pariétal supérieur avait pour objectif d'étudier son rôle fonctionnel dans l'écriture ; de déterminer si celui-ci était uniquement périphérique, sensori-moteur, ou plus central d'interface avec les aires du langage. Les effets comportementaux d'une telle stimulation, par rapport à la stimulation placebo, n'étaient là encore pas clairement marqués. Il semble que les latences lors de la tâche de dictée aient été sensiblement plus rapides après cette stimulation pariétale ($p = .066$), et ce, quel que fût le type de mot écrit (cela s'accompagnait de plus d'une augmentation de la pression et d'une diminution de la distance du tracé). Cette « amélioration » de la performance globale était particulièrement visible dans la tâche de Stroop. Bien que cet effet aille dans le sens d'une facilitation plutôt que d'une

perturbation, le fait qu'il ne soit pas influencé par un facteur tel que la régularité suggère qu'il interviendrait à un niveau périphérique.

Les effets de la stimulation dans la tâche de Stroop apparaissent en réalité plus complexes. Les latences étaient significativement améliorées (i.e. réduites) uniquement lors de la dénomination, alors que lorsque l'on s'intéresse à la longueur du tracé (i.e. distance, ou « taille d'écriture »), celle-ci était significativement réduite uniquement en copie (voir Figure IX-11).

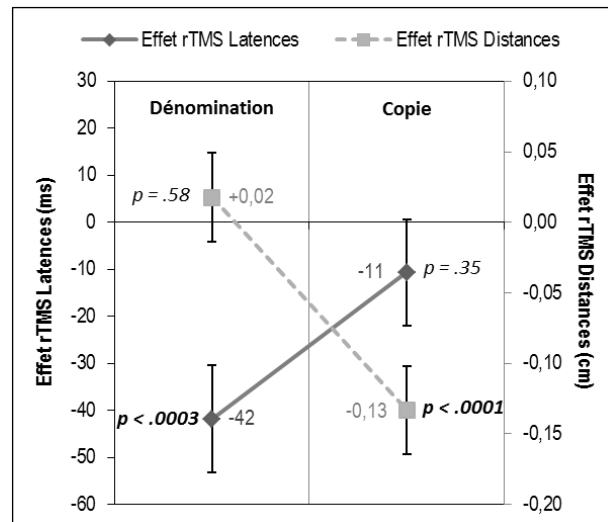


Figure IX-11 : Illustration des effets de la stimulation rTMS sur les latences et sur la distance du tracé, en copie et en dénomination dans la tâche de Stroop à l'écrit. Données extraites des deux analyses statistiques correspondantes. L'effet correspond à l'écart des moyennes ajustées (« rTMS active - placebo »), les barres d'erreur représentent l'erreur-type.

Des effets facilitateurs d'une stimulation « inhibitrice » ne sont pas rares lorsque le processus ciblé est de nature cognitive (e.g. Andoh et al., 2006). Dans une tâche motrice simple (Kobayashi, Hutchinson, Theoret, Schlaug, & Pascual-Leone, 2004) ont en fait aussi montré qu'une la stimulation à 1 Hz de l'aire M1 améliorait la rapidité du mouvement réalisé avec la main ipsilatérale (alors qu'aucun effet n'était visible sur la main controlatérale, pourtant plus directement ciblée par la stimulation). Ce résultat était interprété comme traduisant une levée de l'inhibition transcalleuse, résultant en une augmentation de l'excitabilité de l'hémisphère opposé. Des effets comportementaux d'une stimulation rTMS (haute ou basse fréquence) du cortex pariétal ou plusieurs fois été rapportés dans le cadre de tâches d'attention visuelle (e.g. Hodsoll, Mevorach, & Humphreys, 2009; Thut, Nietzel, & Pascual-Leone, 2005). L'effet généralement obtenu se traduit par une meilleure « résistance à la distraction » (i.e. capacité à ignorer un distracteur non pertinent). Bien qu'il s'agissait uniquement dans ces travaux de stimulation de l'hémisphère droit (le cortex pariétal postérieur droit est connu pour avoir un rôle central dans le contrôle de l'attention visuelle), l'amélioration des latences dans la condition

de dénomination de la tâche de Stroop que nous observons semble pourtant bien traduire une amélioration de la capacité des participants à focaliser leur attention sur la couleur de l'encre, ou au contraire une diminution de l'effet de « capture attentionnelle » par les lettres présentées à l'écran (quoique, selon cette dernière hypothèse, l'effet de congruence aurait dû aussi être réduit). On peut donc ainsi postuler que l'effet de la rTMS était ici plutôt de nature attentionnelle, se manifestait uniquement lorsque le participant devait se concentrer sur la couleur de l'encre (d'où l'absence d'effet en copie), et résultait d'une modification de la balance interhémisphérique au niveau du cortex pariétal supérieur. Ces hypothèses, qui prédisent des effets différentiels de stimulation pariétales droites et gauche en tâche de Stroop (que celle-ci soit manuelle ou orale) nécessitent d'être étayées par davantage de données expérimentales (le rôle du cortex préfrontal dorsolatéral a en effet jusqu'à présent surtout été étudié dans ce contexte ; e.g. Vanderhasselt, De Raedt, Baeken, Leyman, & D'haenen, 2006).

Une de nos hypothèses initiales d'un rôle sensorimoteur très périphérique du cortex pariétal supérieur gauche dans l'écriture ne permet pas non plus d'expliquer l'effet de réduction de la distance que nous observons (i.e. traduisant une diminution de la taille d'écriture ou de l'amplitude des boucles, etc.). En effet, il aurait dû être observé quel que soit le mot écrit (en dictée) et dans toutes conditions de la tâche de Stroop. Le même type d'objection s'oppose aussi à une interprétation en termes de perturbation de la représentation visuospatiale du tracé produit. Or on l'observe uniquement lorsque l'orthographe du mot est récupérée (ou plutôt le mot identifié, trois réponses seulement étant possibles) à partir d'un mot lu. Il est difficile d'en déduire un effet linguistique d'amélioration des processus de conversion graphème-phonème de la lecture, tels que l'ont par exemple observé Costanzo, Menghini, Caltagirone, Oliveri, et Vicari (2012) lors d'une stimulation rTMS haute-fréquence du cortex pariétal inférieur gauche, puisqu'il ne se traduit pas par une amélioration des latences (qui sont le meilleur indicateur de la performance à la tâche). Dans un travail utilisant la stimulation haute-fréquence de l'aire motrice supplémentaire chez des patients parkinsoniens, Randhawa et al. (2013) ont montré qu'une telle stimulation se traduisait par une semblable augmentation de la taille d'écriture, dans une tâche d'écriture de boucles (bien qu'apparemment restreinte aux traits dirigés vers le haut). La taille d'écriture chez ces patients a ainsi été interprétée comme un indicateur d'un meilleur contrôle musculaire après la stimulation. Le fait que le contrôle musculaire (ou en amont, la programmation graphique de sortie ; voir modèle de Roeltgen, 2003), lors de l'écriture des mêmes mots, ait été affecté différemment en copie et en dénomination, semble traduire le fait que l'exécution motrice d'un même tracé puisse être modulée par le contexte dans lequel ce tracé se produit. Cela pourrait expliquer pourquoi nous observons une vitesse d'écriture légèrement plus rapide dans la condition de copie par rapport à la condition de dénomination (différence qui n'était cependant pas présente dans le premier groupe). Cette influence

contextuelle, des processus centraux, reposerait sur le rôle intégratif d'interface joué par le cortex pariétal supérieur, qui montre en effet une connectivité fonctionnelle différente avec les différentes aires du langage selon la tâche réalisée (résultats de Segal & Petrides, 2012).

Les effets de la rTMS sur le comportement que nous avons rapportés sont cependant d'amplitude trop faible pour que l'on soit en mesure d'apporter des conclusions définitives et d'exclure la possibilité de biais dont les origines peuvent être multiples malgré l'ensemble des facteurs que nous avons tenté de contrôler (différences interindividuelles, dans le style ou le comportement d'écriture différents, évolution différente entre la première et la seconde session, fiabilité de la stimulation elle-même, son intensité, la localisation de l'aire fonctionnelle réellement ciblée chez chaque participant, etc.). Bien qu'ils restent compatibles avec certaines des hypothèses précédemment avancées (rôle intégratif, interface entre les aires du langage et celles de la motricité), en tout état de cause nos résultats ne nous permettent pas confirmer le rôle crucial dans l'écriture du cortex pariétal supérieur gauche.

VII. EXPERIMENTATION rTMS: SYNTHÈSE ET CONCLUSION

VII.1. Les limites de l'étude

Ce travail avait pour objectif d'identifier les effets sur le comportement de l'inhibition par rTMS 1Hz des deux aires les plus fréquemment rapportées activées lors de l'écriture en neuroimagerie et dont le rôle est considéré comme crucial pour cette compétence : la GMFA et le CPS. Force est de constater que nous n'avons pas obtenu de résultats suffisamment probants pour confirmer le caractère crucial dans l'écriture de chacune de ces deux aires. L'écriture n'était pas ressentie par les participants comme plus ou moins aisée après la stimulation. Les effets de la rTMS rapportés dans la littérature sont souvent sensibles, matérialisés par des différences de l'ordre de quelques dizaines de millisecondes dans une condition par rapport à une autre, et d'autant plus difficiles à mettre en évidence de manière significative que le processus ciblé est de haut niveau. Les effets d'une stimulation TMS peuvent, on l'a vu, largement dépendre de la fréquence de cette stimulation, mais aussi de son intensité. En outre, ces effets varient dans le temps et de manière différente selon l'aire ciblée ; Terao et al. (2007) ont par exemple montré que les latences dans une tâche motrice manuelle très simple pouvaient être significativement affectées dans les 5 à 10 premières minutes après une stimulation 1 Hz (délai dans les latences d'environ 20 ms, lorsque l'aire stimulée était M1 ou l'aire motrice supplémentaire, mais aucun effet lors d'une stimulation du cortex pariétal postérieur). L'effet sur les latences pouvait disparaître ensuite (aux alentours de 10 minutes) pour réapparaître à nouveau (aux alentours

de 20 minutes) et subsister jusqu'à une heure après la stimulation. Ce type de phénomène peut en partie expliquer notre difficulté à mettre en évidence un impact clair de la stimulation sur une tâche donnée, avec le nombre restreint de participants impliqués, d'autant plus que nous utilisions deux tâches réalisées de manière consécutive, avec un ordre différent, et dont la moitié avaient nécessairement déjà réalisé ces tâches une première fois.

La stimulation, même focale, d'une région par TMS peut aussi avoir des effets complexes sur des régions extérieures à celle ciblée, par propagation de manière cortico-corticale, inter- ou intra-hémisphérique, ou via des projections sous-corticales (Chouinard, Van Der Werf, Leonard, & Paus, 2003). Nous avons vu que de tels effets, de modulation de l'activité corticale distribuées au sein d'un réseau plutôt qu'uniquement restreints à l'aire ciblée sont parfois les mieux à même d'expliquer des effets de facilitation a priori paradoxaux. La diminution globale de la pression d'écriture après stimulation de la GMFA pourrait résulter ainsi d'un effet moteur (cortex moteur primaire), certains des effets obtenus en tâche de Stroop après stimulation pariétale droite résultant peut-être de phénomènes attentionnels (cortex pariétal droit).

Une autre limite de cette expérimentation résidait dans notre difficulté à localiser la cible, ou plutôt à s'assurer que la cible définie avait bien le même rôle fonctionnel chez tous les participants. Les contrastes d'imagerie fonctionnelle, pour des raisons déjà évoquées, se sont révélés relativement infructueux pour isoler de manière claire au niveau individuel un pic d'activité correspondant à la GMFA d'une part ou à l'aire d'écriture pariétale d'autre part. Bien que la méthode utilisée, consistant à limiter notre recherche de ce pic à l'intérieur d'une sphère restreinte centrée sur des coordonnées issues de notre méta-analyse ait semblé plutôt valable concernant la GMFA (les pics semblent localisés de manière assez homogène au travers des différents participants), il semble que cela ait été moins le cas avec le CPS. Nous avons déjà évoqué l'« hétérogénéité anatomique et fonctionnelle » du cortex pariétal supérieur, lorsqu'il est activé lors d'une tâche d'écriture (pics dans le gyrus postcentral, le lobule pariétal supérieur, ou le lobule pariétal inférieur), et il est ainsi impossible à déterminer si l'aire stimulée (correspondant au pic de plus forte intensité) correspondait réellement chez tous nos participants à la même aire fonctionnelle.

VII.2. Des effets distincts selon le site de stimulation ?

Cette expérimentation utilisait un protocole et des tâches en tous points identiques pour les deux groupes de participants : ceux pour lesquels la stimulation rTMS était ciblée sur la GMFA et ceux pour lesquels elle était ciblée sur le CPS. Pourtant, au-delà du facteur stimulation, nous pouvons relever quelques différences notables sur certaines variables comportementales,

qui résultent de l'importante variabilité interindividuelle que l'on observe souvent lors de tâches d'écriture, et qui rendent difficilement envisageable l'intégration des données des deux groupes dans une même analyse. Par exemple, si les sujets du premier groupe présentaient des latences plus rapides, leur vitesse d'écriture était plus lente que celle du second groupe. Certains effets comportementaux des variables manipulées peuvent ainsi émerger chez un groupe alors qu'ils n'étaient pas significatifs dans le précédent. La comparaison des performances d'un groupe « par rapport à lui-même » (stimulation active vs. stimulation placebo) nous a donc ainsi semblé la seule manière de démontrer un effet de la stimulation de manière valide. Il peut pourtant être utile de comparer les résultats obtenus dans chacun de ces groupes pour démontrer que la stimulation a bel et bien eu des effets différents selon le site cortical sur lequel elle était ciblée.

Malgré toutes les limites évoquées plus haut, les analyses statistiques des données comportementales mettent bien en évidence certains effets de la stimulation rTMS active par rapport à la stimulation placebo, bien que les effets initialement recherchés n'atteignaient souvent pas le seuil de significativité. Lorsque l'on s'intéresse par exemple aux modulations de l'effet de longueur sur les latences, sur le groupe stimulé sur la GMFA et sur le groupe stimulé sur le CPS (illustré dans la Figure IX-12 ci-après), il semble bien que les deux stimulations aient eu des effets différents : latences rallongées pour les mots longs après stimulation de la GMFA mais au contraire sensiblement accélérées pour tous type de mots après stimulation du CPS. Nous en avons déduit que ces deux aires avaient un rôle dans la programmation graphomotrice, mais un rôle différent. Bien que l'effet de la stimulation de la GMFA sur les mots longs était influencé par la régularité du mot (ou peut-être simplement la longueur du tracé), il suggère un rôle semblable à une mémoire de travail. Les effets périphériques observés, ainsi que certaines observations faites précédemment (lors des expérimentations en IRMf), nous amènent cependant à mettre en doute la nature orthographique des représentations impliquées. L'hypothèse d'un stockage temporaire de la représentation graphomotrice de sortie, en tant que séquence de gestes moteurs à réaliser pourrait selon nous expliquer l'effet observé ici tout en étant compatible avec l'observation de son activation lors du dessin et l'absence de son activation lors de l'épellation orale.

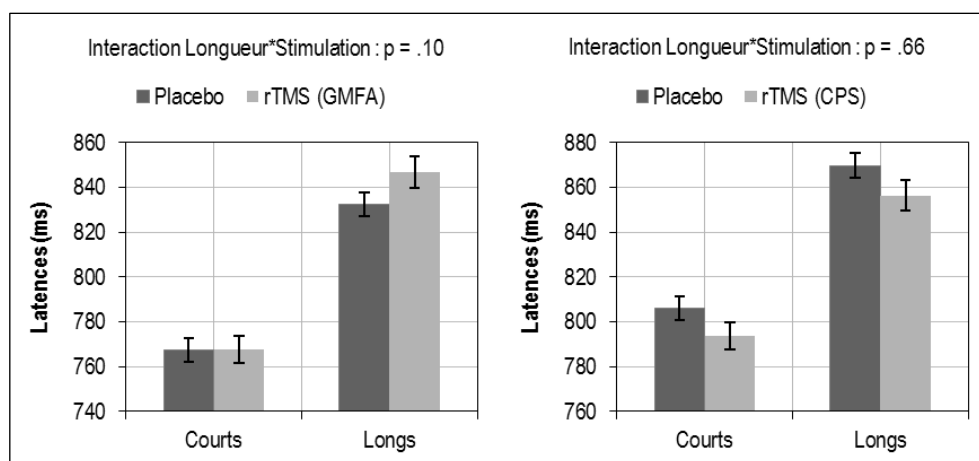


Figure IX-12 : Moyennes brutes (et erreur-types) des latences des mots courts et longs selon le type de stimulation dans les deux groupes de participants. L'effet de stimulation était uniquement significatif sur les mots longs après une stimulation de la GMFA.

Le rôle fonctionnel du cortex pariétal supérieur dans l'écriture n'apparaît pas beaucoup plus clair au travers de cette expérimentation. Il semble que les réponses motrices des participants étaient fournies de manière plus rapide mais aucun effet relatif à la nature du mot écrit en tâche de dictée ne laisse suggérer un effet plus central. La nature complexe de son rôle, tel qu'observé par Segal et Petrides (2012) en connectivité fonctionnelle ou rapporté par Magrassi et al. (2010) en stimulation corticale directe explique probablement pourquoi il est difficile de l'isoler dans une tâche nécessairement complexe et faisant appel à des processus cognitifs variés comme une tâche d'écriture. Les effets obtenus lors de la tâche de Stroop nécessitent cependant davantage d'investigations pour trancher entre un effet de modulation attentionnelle ou une réelle perturbation des processus périphériques de l'écriture.

VII.3. Conclusion

Au travers de cette expérimentation, qui constitue un des tous premiers travaux cherchant à étudier l'écriture grâce à la technique de TMS, nous espérons relever suffisamment d'indices pour éclairer la nature du rôle fonctionnel dans l'écriture de chacune des aires ciblées. Notre approche a donc consisté à recueillir de nombreux indices comportementaux dans une réelle tâche d'écriture cursive proche des conditions d'écriture usuelles. Pourtant, la limitation de nos connaissances concernant les déterminants cognitifs de chacun de ces indices comportementaux (e.g. vitesse d'écriture, pression, etc.), que nous avons notamment tenté d'aborder au Chapitre V, rend l'interprétation des résultats complexe. Une combinaison de résultats issus d'approches plus spécifiques, ciblant un processus ou un groupe de processus cognitifs restreint (e.g. étudier l'accès orthographique en limitant la réponse motrice par une

tâche de détection de lettres ou de rimes, focaliser sur la production graphomotrice en faisant écrire les lettres de l'alphabet de manière soutenue et continue) permettra probablement dans l'avenir, grâce à la même technique de TMS ou des méthodologies alternatives (e.g. stimulation théta-burst excitatrice, stimulation *online*), d'aboutir à une réelle compréhension du rôle spécifique rempli par chacune de ces deux aires.

**SYNTHESE
&
CONCLUSION**

CHAPITRE X : SYNTHÈSE ET DISCUSSION GÉNÉRALE

I. INTERACTION DES PROCESSUS CENTRAUX ET PÉRIPHÉRIQUES EN PRODUCTION ÉCRITE

La première partie expérimentale de ce travail de thèse visait à mieux comprendre l'organisation temporelle des processus centraux et périphériques à l'œuvre dans la production écrite de mots isolés par une approche psycholinguistique. Nous cherchions en effet de manière générale à comprendre de quelle manière les étapes de traitement centrales décrites dans les modèles cognitifs de l'écriture, visant à la préparation du message, se répercutent sur les différents indicateurs de l'exécution motrice, périphérique, à notre disposition (e.g. latences et vitesses d'écriture). Nous avons vu comment le débat, essentiellement issu des travaux sur la production orale du langage (e.g. Levelt et al., 1991), sur la nature de la transmission de l'activation entre les différents niveaux centraux de traitement, s'était étendu jusqu'à l'accès aux niveaux les plus périphériques, et en modalité écrite (e.g. Roux & Bonin, 2012). Deux conceptions s'opposent, sérielle ou en cascade, prédisant des effets comportementaux différents. Au-delà de la question cruciale de la nature de la transmission de l'activation entre les niveaux centraux et périphériques dans l'écriture, l'étude de cette question s'inscrivait dans une problématique plus générale dans la mesure où nous souhaitions être en mesure de distinguer dans une expérimentation ultérieure des effets centraux et des effets périphériques découlant d'une stimulation par rTMS de certaines aires cérébrales.

Le débat entre les conceptions sérielle et en cascade au niveau où nous l'avons placé a essentiellement consisté à déterminer si la réponse motrice dans une tâche de dictée (i.e. le mot écrit), était entièrement planifiée au moment de l'initialisation de la réponse – si les étapes périphériques étaient « encapsulées » – ou si celles-ci étaient programmées en parallèle alors que les étapes centrales n'étaient pas entièrement abouties. Afin d'être en mesure de manipuler les étapes centrales de traitement et leur manifestation sur le comportement, nous nous sommes intéressés aux phénomènes de régularité ou de consistance lors de la production orthographique. Nous avons vu que différentes approches avaient été employées en français pour mesurer le degré de régularité phono-orthographique (Lecours, 1996; Peereman & Content, 1999), qui traduit la stabilité des relations entre les phonèmes et les graphèmes et qui peut être utilisé en tant qu'indice de l'implication des voies lexicales et phonologiques dans la

récupération de l'orthographe d'un mot. Plusieurs auteurs ont ainsi montré que la présence d'une séquence irrégulière provoquait un conflit, le produit des deux voies étant différent, se manifestant notamment par une augmentation des latences d'écriture (Bonin et al., 2002; Bonin et al., 2001b; Delattre et al., 2006; Perry & Ziegler, 2004).

I.1. L'influence de la régularité sur les latences et les vitesses d'écriture en production écrite sous dictée de mots isolés

Notre première expérimentation avait ainsi pour objectif de reproduire de tels effets en utilisant l'approche de la régularité de Lecours (1996) et Soum (1997) qui avait selon nous l'intérêt de s'appuyer sur des mesures plus représentatives des mots de langues que d'autres approches limitées aux mots monosyllabiques. Les résultats obtenus ont confirmé que le conflit central lié à la présence de l'irrégularité entraînait bien davantage d'erreurs orthographiques ainsi qu'un délai dans les latences, mais surtout, conformément à des résultats rapportés dans la littérature en dénomination d'images (mais pas en écriture sous dictée ; Bonin et al., 2001b), ce délai ne survenait que lorsque l'irrégularité était localisée sur l'initiale du mot ; la présence d'une irrégularité à la fin du mot n'entraînait pas de délai supplémentaire. La longueur orthographique des mots était aussi manipulée lors de cette expérimentation (mots de 1 syllabe et 4,9 lettres vs. 3 syllabes et 8,3 lettres), non seulement car la longueur permet d'interroger une étape cruciale des modèles de production écrite qu'est le buffer graphémique, mais aussi car elle module le degré de planification nécessaire. Tout comme les effets de la régularité, les effets de longueur sur les latences que nous avons obtenus (absents, ou contraires à nos attentes lorsque la durée acoustique des stimuli était prise en compte) s'opposent à l'idée d'une planification complète de la réponse, de manière temporellement distincte, avant son initialisation. Nous souhaitons en outre par cette expérimentation mettre en évidence des effets périphériques de la présence de l'irrégularité, à la suite de Delattre et al. (2006) qui avaient montré que la durée d'écriture des mots irréguliers était plus longue, comme si le coût du conflit central se répercutait, en cascade, sur l'exécution de la réponse elle-même. Nous avons ainsi mesuré la vitesse d'écriture et montré que celle-ci était bien réduite pour les mots irréguliers, mais cet effet n'était présent que sur les mots irréguliers sur l'initiale. Ce résultat, bien qu'il semble au premier abord s'accorder avec certaines données de la littérature (utilisant des irrégularités en « début » de mot mais pas spécifiquement sur le phonème/graphème initial (Roux et al., 2013)) apparaît comme un effet périphérique d'un conflit *déjà résolu*. L'irrégularité finale, davantage susceptible de n'être pas résolue au moment de l'initialisation, n'apparaissait pas au contraire

affecter la dynamique de l'écriture, remettant en cause l'idée d'un coût comportemental d'une telle irrégularité.

Ces mêmes questions ont guidé la mise en œuvre de notre seconde expérimentation en écriture sous dictée, qui se voulait plus développée ; en utilisant un nombre de stimuli beaucoup plus conséquent (en renonçant à l'appariement deux à deux des mots consistants et inconsistants), et utilisant nos propres mesures de consistance phono-orthographiques. Nous avons en effet voulu fournir des mesures de consistance se voulant beaucoup plus représentatives des mots de la langue française (calculées sur plus de 140 000 formes orthographiques) que celles qui sont le plus souvent utilisées en psycholinguistique. L'analyse des erreurs orthographiques produites en dictée par nos participants a permis de valider ces mesures de consistance et de prédire, dans une certaine mesure, le comportement de scripteurs adultes. Ce travail était un premier pas en direction de la constitution d'une base de données proposant des calculs de la stabilité des relations entre phonème et graphèmes basés sur l'ensemble des mots de la langue et prenant en compte les nombreux paramètres impliqués (e.g. position de l'unité dans le mot, nombre de syllabes, structure syllabique, classe grammaticale, etc.).

L'analyse des données de dynamique de l'écriture, latences et vitesses du tracé, a confirmé les résultats de notre première expérimentation ; le nombre de lettres à produire ne détermine pas le délai d'initialisation, il n'est pas non plus influencé par la présence d'une inconsistance finale. Nous sommes cependant ici parvenus à mettre en évidence un effet de la présence d'une inconsistance finale sur la vitesse d'écriture du mot ; effet conforme aux résultats de Delattre et al. (2006) montrant une durée d'écriture rallongée pour les mots irréguliers, et que nous prédisions en tant qu'indice de la résolution, au cours de la production, de cette inconsistance. Afin de mieux comprendre comment de tels conflits centraux se répercutent en cascade sur les processus périphériques d'exécution de la réponse, Roux et al. (2013) avaient utilisé des mesures de la durée d'écriture moyenne d'un trait au sein de chaque lettre (5 premières lettres) dans une tâche de copie impliquant une écriture en caractères d'imprimerie et en majuscules. Nous avons développé une approche méthodologique similaire mais qui nous semblait plus adaptée aux contraintes de l'utilisation du format d'écriture plus écologique qu'est l'écriture cursive car elle ne nécessitait pas de découper la production en lettres ou en traits (strokes). L'analyse de ces *vitesse d'écriture moyenne par portion de la durée d'écriture du mot* nous a conduits à remettre en cause l'idée d'un ralentissement global de la vitesse d'écriture reflétant la résolution par anticipation d'une inconsistance finale (tel que rapporté par Roux et al., 2013) : le ralentissement n'était pas situé en amont, ou tout au long du mot, mais plutôt sur la dernière portion. Il semblait en outre souvent résulter d'un biais lié à la nature des graphèmes

tracés plutôt qu'à la consistance phono-orthographique. Nous avons uniquement été conduits à postuler la présence d'un ralentissement d' « origine centrale » au niveau de la première syllabe lorsque le mot était inconsistant sur la troisième syllabe (donc sur les mots de trois syllabes uniquement). L'effet de ralentissement rapporté dans notre première étude en cas d'irrégularité initiale n'a pas été reproduit ce qui nous amène à rejeter l'hypothèse d'une influence d'un conflit déjà résolu.

Au terme de ce travail nous avons donc été amenés à proposer un modèle explicatif des effets de la régularité orthographique sur la dynamique de la production écrite plus complexe que postulé initialement. La Figure X-1 ci-après détaille une telle proposition dynamique avec transmission de l'information en cascade qui dépasse la simple représentation séquentielle des modèles classiques (aussi représentée).

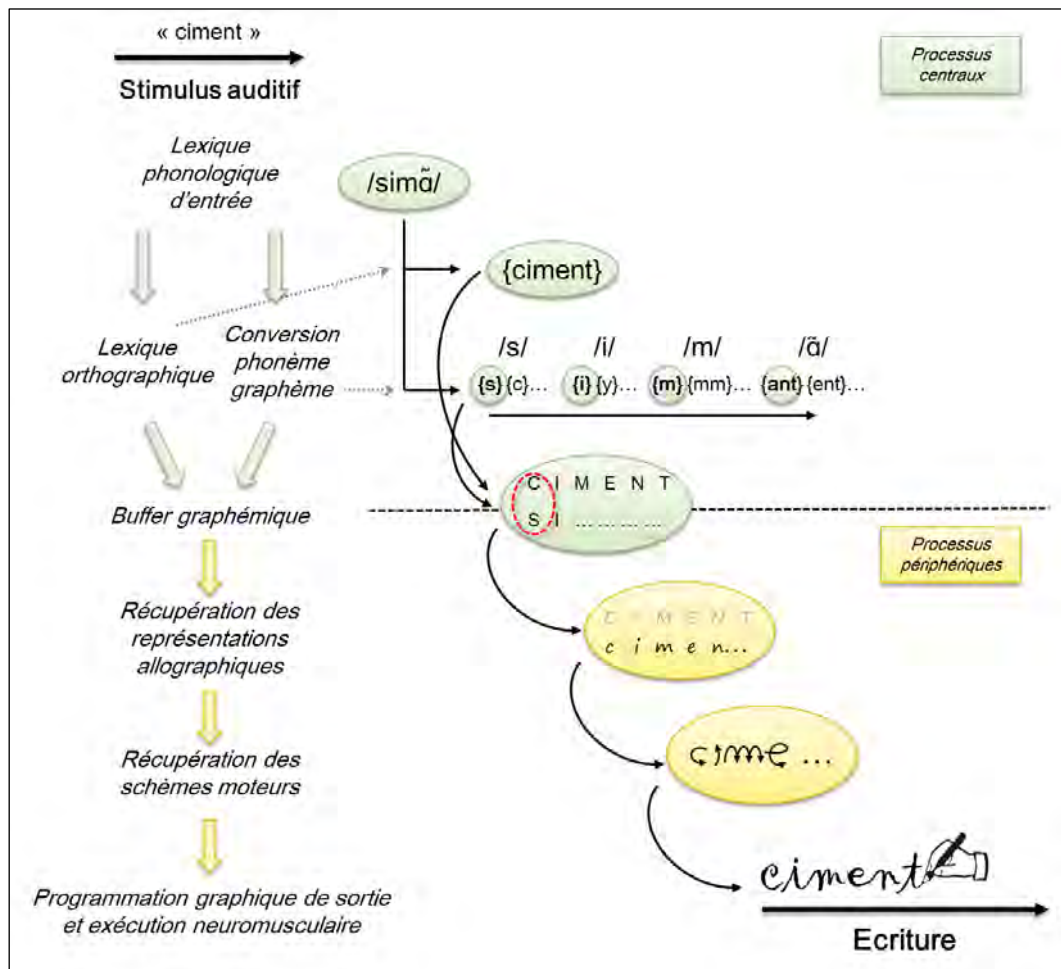


Figure X-1 : Proposition d'un modèle de traitement en cascade des processus centraux et périphériques en écriture sous dictée. Les étapes périphériques sont déclenchées dès l'activation des premiers graphèmes dans le buffer graphémique mais un conflit survient quand la représentation graphémique du premier phonème activé par les deux voies est différent (ovale en pointillés rouges), provoquant un allongement du délai d'initialisation de la réponse. Selon cette conceptualisation, les étapes périphériques elles-mêmes sont activées en cascade, sans nécessiter un aboutissement de l'étape en amont.

Nous avons exclu l'hypothèse d'une programmation du geste d'écriture survenant totalement avant l'initialisation de la réponse : les étapes périphériques, allographiques et de sélection des schèmes moteurs sont réalisées en parallèle car la durée d'initialisation n'est pas affectée par la longueur de la réponse à produire ni par la présence d'une séquence orthographique ambiguë si celle-ci est suffisamment éloignée de l'initiale. Lorsque le mot est entendu, la transmission de l'activation de la voie phonologique se produit de manière aussi rapide que celle de la voie lexicale, mais uniquement pour ce qui est des premiers phonèmes du mot. Le conflit est à résoudre si cette initiale est irrégulière et la réponse est initialisée dès que la décision est prise. La question de la possibilité d'une répercussion en cascade des étapes centrales de traitement, de l'influence de la phonologie (de la voie de conversion phonème-graphème, opérant par les règles tacites de la consistance) sur les étapes périphériques, a été explorée par différents auteurs suivant plusieurs approches telles que le recueil de la durée d'écriture du mot, de la durée d'écriture des traits composant chaque lettre et, ici, par l'évolution de la vitesse d'écriture au cours de la production. Nos données tendent à montrer une telle répercussion sur la vitesse, mais tantôt uniquement en cas d'irrégularité initiale (première expérimentation) tantôt uniquement en cas d'irrégularité finale (seconde expérimentation). Le faible coût sur le comportement de la présence d'une irrégularité finale (pas d'effet sur les latences, effet sur la vitesse variant selon les covariables prises en compte ainsi que selon le nombre de syllabes du mot) par rapport à l'irrégularité initiale, pourrait traduire une « consolidation » de l'activation de la voie lexicale une fois le mot correctement identifié (une fois le point d'unicité phonologique ou orthographique atteint).

I.2. L'écriture manuscrite, un objet d'étude complexe

De nombreux processus cognitifs sont à l'œuvre lors de l'écriture d'un simple mot. Nous nous sommes pour l'instant essentiellement focalisés sur l'influence de la phonologie, par le biais de la consistance, mais nous avons vu lors des parties introductives de ce travail comment de nombreuses étapes de traitement, réparties entre deux grandes classes de processus (i.e. les processus centraux et périphériques), jouaient chacune leur rôle pour aboutir à l'information que le chercheur récupère : le tracé graphique.

L'écriture manuscrite cursive en particulier est en effet un objet d'étude complexe, qui comprend de nombreuses sources de variabilité interindividuelle : le « style d'écriture », qui désigne les particularités du produit fini (forme des allographes), mais aussi des variations d'ordre dynamique (séquences des traits composant les lettres) ou simplement motrices (vitesse, pression exercée par le stylo). Son étude nécessite donc de composer avec cette

variabilité en contrôlant un maximum de paramètres et en faisant appel à un nombre de participants et de stimuli conséquent. Les travaux s'intéressant à la dynamique de la production de mots isolés font ainsi plus souvent appel à des tâches d'écriture en caractères d'imprimerie majuscules pour lesquelles le tracé est globalement identique chez tous les sujets et pour lesquelles il est plus aisé de déterminer les frontières inter-lettres, voire les traits au sein des différentes lettres (quoique certaines méthodes, déviées de l'analyse du profil de vitesse, permettent aujourd'hui de réaliser des segmentations de l'écriture cursive par lettres et par traits de manière assez automatique : Guinet & Kandel, 2010; Kandel & Spinelli, 2010). Tout au long de ce travail, jusque dans les expérimentations en IRMf et utilisant la rTMS, nous avons pris le parti d'utiliser des tâches d'écriture cursive, « usuelle », car celles-ci nous semblent plus écologiques, mieux à mêmes de reproduire et donc d'étudier le comportement d'individus adultes sains. Ce choix a pu conduire à rendre plus complexe l'interprétation de certains effets, sur la vitesse d'écriture par exemple, mais l'existence de dissociations neuropsychologiques entre ces deux formats d'écriture dans certaines formes d'agraphie périphérique (Di Pietro et al., 2011; Zesiger, Pegna, & Rilliet, 1994) suggère que l'objet d'étude n'est pas complètement identique dans les deux cas. Les représentations des lettres de l'écriture cursive seraient beaucoup plus familières et représentées comme des unités visuospatiales alors que les lettres majuscules seraient moins familières et représentées en tant que séquences de traits (Di Pietro et al., 2011; Teulings & Schomaker, 1993).

La production orthographique du langage, particulièrement dans ses composantes centrales, peut être questionnée, que ce soit en psycholinguistique ou en neuropsychologie cognitive, par d'autres biais ou moyens détournés que l'utilisation d'une réelle tâche d'écriture réalisée avec un stylo (effets d'amorçage, tâches de décision orthographique/de rimes, épellation orale, écriture sur clavier, etc.). L'écriture usuelle est un objet d'étude en effet susceptible de poser de nombreuses difficultés, notamment en imagerie, étant donné son caractère composite. Nous estimons néanmoins que ce caractère composite fait partie intégrante de la compétence du scripteur dont nous cherchons à rendre compte et qu'à ce titre, nous ne pouvons négliger les caractéristiques primordiales qui la constituent.

II. LE RESEAU CEREBRAL DE L'ECRITURE MANUSCRITE

II.1. Un réseau cérébral vaste mis en évidence par la neuroimagerie

La mise en évidence par les techniques de neuroimagerie des aires cérébrales impliquées dans le processus d'écriture, alors que les liens entre symptômes agraphiques et lésions

cérébrales constituaient notre principale source d'information, est devenue un objet de préoccupation relativement récemment. Au-delà d'une lecture critique la plus exhaustive possible des travaux publiés, nous avons estimé que ceux-ci étaient aujourd'hui suffisamment nombreux pour tenter d'en intégrer les résultats grâce à une méthode quantitative. 12 aires distinctes, constituant un réseau cortical et sous-cortical fortement latéralisé à l'hémisphère gauche, ont été identifiées lors de ce travail de méta-analyse utilisant la méthode ALE. Une classification des contrastes d'imagerie inclus en deux catégories distinctes, mimant le schéma expérimental des travaux visant à identifier les aires spécifiques de l'écriture (contrastes contrôlant les processus centraux non spécifiques, de traitement de l'entrée vs. contrastes contrôlant les processus non spécifiques périphériques, du contrôle de la sortie) était réalisée dans cette étude et a ainsi guidé la proposition de certaines hypothèses quant au rôle fonctionnel de chacune de ces aires. Nos travaux ultérieurs en neuroimagerie, bien qu'ils se soient souvent révélés infructueux concernant la caractérisation précise du rôle de certaines aires, l'identification des composantes centrales ou spécifiques de l'écriture, ou pour traduire en termes d'activité cérébrale des modulations d'ordre cognitif (e.g. âge d'acquisition des mots écrits), nous permettent de confronter ces résultats obtenus à de telles hypothèses.

II.2. Traitement de l'entrée et récupération de la représentation orthographique

Les expérimentations de neuroimagerie de l'écriture impliquent la plupart du temps la production d'une réponse suite à la présentation d'un stimulus : mot écrit, présenté auditivement, image, etc. C'est un moyen de s'assurer que tous les participants réalisent tous une tâche identique, accèdent aux mêmes représentations sémantiques, orthographiques, graphomotrices, et recrutent donc les mêmes circuits cérébraux (contrairement à ce qu'impliquerait une tâche d'écriture plus écologique d'écriture spontanée). On peut ainsi tout d'abord distinguer des aires cérébrales dédiées au traitement « primaire » du stimulus ; nous avons par exemple retrouvé d'importantes activations du cortex visuel communes à nos différentes tâches impliquant la présentation visuelle d'un dessin, ou, quoique de manière beaucoup plus marginale, du cortex auditif lors de la tâche de dictée. Puisque nous avons inclus dans notre méta-analyse à la fois des contrastes issus de tâches réalisées sur entrée visuelle et sur entrée auditive nous pouvions raisonnablement conclure que les activations communes mises en évidence ne reflétaient pas de telles aires de traitement primaire de l'entrée. Entrent ensuite en jeu des aires plus langagières, dédiées à l'extraction de l'information linguistique en

vue de son transcodage en gestes moteurs manuels ou en toute autre forme de production du langage.

Nous avons en particulier identifié une aire du cortex prémoteur ventral, à la jonction avec le gyrus frontal inférieur, fréquemment activée lors de l'écriture mais souvent absente des contrastes dans lesquels le traitement linguistique du stimulus était contrôlé : du type « dénomination écrite vs. dénomination orale ». Son rôle est tantôt associée à la conversion des phonèmes en graphèmes (Omura et al., 2004; Purcell et al., 2011a), tantôt à la récupération de la représentation orthographique lexicale (Rapp & Dufor, 2011). Sa fonction est ainsi souvent perçue comme partagée ; que la tâche soit écrite ou orale. Nos données d'IRMf ne sont pas réellement en faveur d'une telle proposition, cette aire apparaissait toujours davantage activée lors de nos tâches de production écrite plutôt que lors de nos tâches de production orale. L'activation commune à l'écriture et la répétition orale concernait plutôt la pars opercularis du gyrus frontal inférieur. De manière plus étonnante cette région prémotrice ventrale semblait tout autant active lors du dessin (n'apparaissait pas dans le contraste « dénomination écrite vs. dessin »), quoique de manière beaucoup plus bilatérale. Nous considérons donc qu'il ne faut pas nécessairement exclure un rôle périphérique de cette région (e.g. représentations motrices des graphèmes). Sa proximité avec l'aire de Broca et les régions motrices articulatoires et manuelles en fait un carrefour important entre les régions linguistiques frontales et temporales et celle dédiées à l'exécution motrice quelle que soit sa forme. Cela pourrait expliquer pourquoi on lui prête à la fois un rôle linguistique commun à plusieurs tâches ou un rôle plus « graphémique ». Les résultats obtenus avec la tâche de dessin (activation de sa contrepartie droite, par comparaison avec l'écriture) nous conduisent à postuler que les activations de cette région prémotrice ventrale reflètent une spécialisation linguistique, au fur et à mesure de l'apprentissage, marquée par une latéralisation à l'hémisphère gauche, d'une aire bilatérale initialement dédiée à la production motrice fine et complexe en général. On peut en outre envisager que certaines parties de cette région prémotrice puissent être recrutées lors de l'accès aux représentations des lettres, que celles-ci doivent être produites (cf. conjonction entre écriture et épellation) ou simplement reconnues (vision passive de lettres : Longcamp et al., 2003).

Nos résultats n'ont pas permis de confirmer le rôle de stockage orthographique d'une seconde aire régulièrement rapportée active : le cortex temporal postérieur inférieur (PITC, gyrus fusiforme). Nous ne sommes en effet pas parvenus à démontrer sa sensibilité à l'âge d'acquisition des mots écrits. Les analyses secondaires réalisées lors de la méta-analyse n'avaient pas non plus permis de classer clairement cette aire parmi le réseau « central », linguistique, de l'écriture, mais cela résultait essentiellement d'une variabilité trop importante

entre les études. Variabilité dans sa localisation, mais aussi dans la facilité avec laquelle son activation peut être mise en évidence. En effet, cette aire n'atteignait pas le seuil de significativité dans notre premier contraste comparant la tâche d'écriture sous dictée avec le repos, alors que cela était le cas lors de la comparaison avec la tâche motrice de dessin de créneaux. La tâche de dénomination d'images utilisée dans notre seconde expérimentation par IRMf permettait difficilement de faire une distinction claire au sein d'un réseau occipito-temporal ventral (gyrus occipital moyen, gyrus temporal inférieur) vraisemblablement davantage impliqué dans la reconnaissance des images, avant l'accès à la représentation orthographique du mot à produire. Cette aire, bien que là encore de manière bilatérale, était en effet tout à fait comprise dans le réseau d'activation correspondant au dessin, alors qu'aucune représentation orthographique n'était vraisemblablement mobilisée. Nos données sont ainsi compatibles avec un rôle de centre de « mémoire visuelle graphique » (Matsuo et al., 2001), mais le rôle orthographique plus central qui est largement soupçonné – il s'agit d'un des sièges lésionnels principaux de l'agraphie lexicale (e.g. Rapcsak & Beeson, 2004) et cette aire serait sensible à la fréquence lexicale des mots écrits (Rapp & Dufor, 2011) – reste encore à confirmer en neuroimagerie.

La diversité des agraphies centrales et des régions cérébrales qui leur sont associées révèle que le réseau sous-tendant les processus centraux de l'écriture ne se limite pas aux deux aires que nous venons d'évoquer : des régions temporales ou pariétales inférieures (gyrus supramarginal, gyrus angulaire) sont vraisemblablement impliquées. Les données obtenues lors de nos expérimentations de neuroimagerie ne permettent cependant pas de le confirmer. Des activations temporales supérieures et du gyrus angulaire ont bien été rapportées lors de la comparaison de l'écriture avec le dessin d'images mais nous avons des raisons de penser qu'elles reflétaient des modulations dans un réseau par défaut plutôt que de réelles activités linguistiques. La tâche contrôle de traçage de créneaux, pourtant peu coûteuse au niveau langagier ne permettait pas en effet de mettre en évidence de telles activations, supposées de nature sémantique ou phonologique. Nous estimons que cette difficulté à mettre en évidence les processus centraux de l'écriture reflète une difficulté plus générale liée à notre choix de travailler avec une tâche où l'écriture est réellement produite. En effet, les tâches utilisées étaient extrêmement simples à réaliser pour nos sujets adultes ; la récupération du nom d'une image est un processus cognitif très peu coûteux qui est réalisé en quelques centaines de millisecondes (voir par exemple Ganushchak, Christoffels, & Schiller, 2011). L'effet BOLD qui en résulte est ainsi moins facilement mesurable, en particulier lorsqu'on le compare dans un paradigme en blocs à celui résultant de l'activité neuromusculaire : la production continue et soutenue d'un geste moteur pendant plusieurs secondes. Il s'agit probablement d'une des limites importantes de l'étude de l'écriture par la neuroimagerie qui explique en partie certaines de nos

difficultés à mettre en évidence des modulations d'ordre cognitif ou linguistique au sein d'un réseau dominé par ses composantes motrices.

II.3. Aires du contrôle moteur de l'écriture

L'écriture est une compétence langagière dont la composante motrice manuelle est prépondérante (bien que l'aspect moteur manuel ne soit pas spécifique de la tâche d'écriture). Nous avons montré, en comparant les expérimentations ayant ou n'ayant pas contrôlé cet aspect (via une tâche contrôle motrice manuelle non linguistique telle que le traçage de cercles), que 4 aires semblaient principalement concernées par les aspects moteurs de l'écriture : le cortex moteur/sensorimoteur primaire, l'aire motrice supplémentaire et pré-supplémentaire, le thalamus gauche, et le cervelet antérieur droit. Toutes ces aires étaient effectivement activées lors des tâches d'écriture sous dictée et de dénomination écrite d'images de nos expérimentations en IRMf (lors de la comparaison avec la ligne de base ou avec la tâche orale). L'activation ou l'absence d'activation de ces aires dans les différents contrastes peuvent nous renseigner sur la capacité des tâches contrôles à réellement contrôler des aspects moteurs non spécifiques. L'aire M1 semblait ainsi davantage activée lors de l'écriture que le traçage de créneaux alors que cela n'était pas le cas lors de la comparaison avec le dessin. Il nous ne semble ainsi pas aussi évident que l'on pourrait le penser que d'étudier l'écriture en s'affranchissant de ses composantes motrices : une tâche motrice autre que l'écriture peut-elle réellement égaler la finesse de la motricité, la vitesse et l'intensité du geste qu'implique l'écriture ? Contrôle-t-on ainsi uniquement une exécution neuromusculaire quelconque ou aussi la sélection et l'exécution de commandes motrices spécifiques des lettres (schèmes moteurs) ? L'aire motrice supplémentaire (tout comme le cervelet droit) apparaît par exemple jouer un rôle majeur qui dépasse le simple contrôle moteur, comme attesté par les effets de sa lésion (Scarone et al., 2009). Les investigations nécessaires, pour caractériser le rôle spécifique ou non à l'écriture de ces aires du contrôle moteur, devront aussi s'étendre au niveau sous-cortical : rôle du thalamus, mais aussi du putamen, présent dans les résultats de la méta-analyse et que nous rapportons activé lors de la tâche de dictée en IRMf. Certains modèles computationnels utilisés dans l'étude de l'écriture de patients parkinsoniens (présentant une « micrographie » ; voir Van Gemmert, Teulings, & Stelmach, 2001) nous fournissent déjà d'importantes contributions pour la compréhension de l'architecture fonctionnelle d'un réseau cortico-sous-cortico-cortical dédié à la réalisation du geste d'écriture en général (voir Gangadhar et al., 2009).

II.4. Les centres fronto-pariétaux de l'écriture

Sugihara et al. (2006) avaient décrit trois « centres de l'écriture » dans l'hémisphère gauche, des aires qui seraient spécifiquement recrutées lors de la production écrite (quelle que soit la main utilisée). Deux d'entre elles ; la GMFA au niveau frontal supérieur (partie postérieure du sillon frontal supérieur) et le lobule pariétal supérieur ont été très régulièrement rapportées en neuroimagerie, ce que notre méta-analyse a très clairement confirmé (ce n'était pas le cas de la troisième, le gyrus supramarginal antérieur). Nos expérimentations en IRMf en ont apporté une nouvelle confirmation puisque ces deux aires étaient activées aussi bien en écriture sous dictée qu'en dénomination écrite d'images. Les comparaisons utilisant à la fois des tâches contrôles linguistiques (e.g. répétition orale) et, en particulier, motrices (e.g. dessin), ne nous ont pourtant pas permis de réellement reproduire les résultats de Katanoda et al. (2001), Sugihara et al. (2006) ou Roux et al. (2009). Nous tendons en réalité à montrer que ces deux aires peuvent être activées dans une tâche motrice complexe même si elle n'est pas orthographique comme l'écriture : dans une tâche de dessin. Concernant la GMFA en particulier, qui ne semblait pas par ailleurs impliquée dans la production orthographique par épellation orale, c'est une latéralisation à l'hémisphère gauche de cette aire bilatérale qui marquerait sa spécificité à l'écriture, et ce, bien que l'activation de sa contrepartie droite reste toujours susceptible d'être détectée.

Plusieurs hypothèses ont été proposées quant au rôle fonctionnel précis joué par chacune de ces deux aires dans l'écriture. Notre expérimentation utilisant la rTMS avait pour objectifs de mettre à l'épreuve ces hypothèses en observant les effets comportementaux de leur inhibition dans une réelle tâche d'écriture. Ces effets comportementaux obtenus étaient malheureusement trop ténus pour que l'on puisse être en mesure d'apporter une conclusion claire. La TMS a en effet semblé produire une combinaison d'effets dans les tâches de dictée et de Stroop à l'écrit ; sur les latences, la vitesse et la pression d'écriture, qui étaient manifestement différents selon la cible de stimulation (frontale ou pariétale) mais dont il était difficile de déterminer la cohérence globale. Le phénomène de répercussion de l'effet neurophysiologique de la TMS de l'aire ciblée vers les aires adjacentes qui lui sont connectées (Chouinard et al., 2003; Siebner et al., 2009) est probablement une des sources de cette complexité. L'analyse des latences a toutefois confirmé une implication différente de la GMFA lors de l'écriture de mots courts ou de mots longs mais l'intervention du facteur de régularité orthographique dans cet effet (semblant lui-même influencer la longueur du tracé produit) laisse subsister un doute quant à une explication uniquement en termes de simple variation du nombre de graphèmes à maintenir en mémoire de travail. S'il se confirme que cette aire présente une sensibilité à la longueur des mots, mais qu'elle n'est impliquée que lorsqu'un geste graphomoteur est exécuté,

nous serions plutôt en mesure de proposer que la représentation stockée de manière temporaire n'est pas une représentation orthographique abstraite mais est plus proche d'une représentation graphomotrice, une succession de schèmes moteurs à exécuter.

Le cortex pariétal supérieur gauche présentait un profil d'activation similaire à la GMFA dans le sens où son activation persistait lorsque la tâche contrôle était orale mais beaucoup moins lorsque la tâche contrôle était motrice. La tâche de dessin en particulier apparaissait beaucoup plus fortement recruter de manière générale le cortex pariétal, supérieur et inférieur bilatéral, que la tâche d'écriture. Il est particulièrement difficile d'isoler l'aire pariétale supérieure spécifiquement engagée dans l'écriture puisque celle-ci est localisée dans une sous-région pariétale, très probablement l'aire PE au niveau antérieur du sillon intrapariétal (Segal & Petrides, 2012), et donc comprise dans un ensemble bilatéral plus vaste dédié au contrôle visuo-moteur et attentionnel. Outre l'incertitude de sa localisation fonctionnelle précise (le pic intrapariétal/postcentral de plus forte intensité dans le contraste « Ecriture vs. Repos » correspondait-il chez tous nos participants à cette aire ?), la stimulation par rTMS a ainsi pu avoir des effets non directement attribuables à la perturbation unique, précise et localisée de cette aire (cf. effets obtenus dans la tâche de Stroop). Bien que ne nous soyons pas parvenus à mettre en évidence des effets centraux d'une telle perturbation, sur l'écriture de mots irréguliers par exemple, un impact dépendant du contexte de la tâche d'écriture (récupérer le nom de la couleur de l'encre, ou la représentation orthographique du mot écrit) nous semble compatible avec la proposition Segal et Petrides (2012) d'un rôle intégratif, d'interface entre les aires du langage et les régions sensori-motrices du contrôle du mouvement. Contrairement aux différentes aires associées aux processus centraux de l'écriture et identifiées par l'étude neuropsychologique des agraphies, son activité lors de l'écriture d'un mot ne serait pas ponctuelle (récupération de la représentation sémantique, phonologique, orthographique) mais coordonnerait les interactions entre différentes aires du réseau, tout au long de la production écrite. La caractérisation de la dynamique de l'activité cérébrale en situation d'écriture nous semble ainsi un enjeu particulièrement crucial pour la compréhension du rôle fonctionnel du cortex pariétal supérieur.

CHAPITRE XI : PERSPECTIVES ET CONCLUSION

I. L'ETUDE DE L'ECRIURE EN PSYCHOLINGUISTIQUE

I.1. Vers une base de données étendue des mesures de consistance

Afin de rendre compte de la complexité orthographique d'une langue opaque comme le français, nous avons besoin d'outils objectifs pour mesurer la stabilité des relations unissant les phonèmes et les graphèmes. Plusieurs chercheurs nous ont déjà fourni de telles mesures de la consistance ou de la régularité orthographique en français (Lete et al., 2004; Peereman & Content, 1999; Peereman et al., 2007; Soum, 1997). Chacun de ces travaux a été conduit avec des objectifs différents et utilisait des mesures basées sur des échantillons de mots différents. Nous ne disposons ainsi pas à l'heure actuelle de mesures plus « universelles » prenant en compte à la fois la grande diversité des formes orthographiques du français (échantillon de mots le plus large possible, incluant des mots de plusieurs syllabes, de différentes classes grammaticales, plurimorphémiques, etc.) et les déterminants contextuels qui influent sur le degré de régularité (structure syllabique, nombreuses règles graphotactiques implicites).

Nous avons voulu faire un premier pas vers la constitution d'une telle base de données ou d'un tel outil de mesure en incluant l'ensemble des items de la base de données des mots du français la plus importante à l'heure actuelle (i.e. Lexique ; New, 2006; New et al., 2004; New et al., 2001), mais en nous étant restreint aux phonèmes initial et final de chaque mot (ce qui nous a permis de démontrer l'importance cruciale de la position de l'unité considérée pour déterminer son degré de régularité). Les travaux futurs s'attellant à la tâche de réaliser des mesures de consistance plus complètes devront relever plusieurs défis et répondre à plusieurs questions, notamment relatives à la gestion de l'étendue de l'unité utilisée pour mesurer la consistance. En effet, le phonème (ou le graphème) unique n'est pas une unité d'étendue suffisante pour englober la plupart des régularités graphotactiques et des règles contextuelles du français (e.g. lettres doubles illégales au début des mots, un {n} est remplacé par un {m} si la lettre suivant est un {p} ou un {b}, etc.) ; il est nécessaire de considérer l'influence de la structure syllabique (tel que réalisé dans la base LEXOP par exemple ; Peereman & Content, 1999) ou du nombre de syllabes des mots contenant ces unités (e.g. la graphie régulière pour un /o/ final

varie considérablement selon que le mot comporte une ou trois syllabes, ou selon que sa structure syllabique soit de type CV ou CCV ; Soum, 1997).

La fiabilité des mesures de consistance est en effet un enjeu majeur en psycholinguistique puisque celles-ci sont utilisées, par le biais de relevés du comportement (e.g. erreurs orthographiques ou temps de réaction en écriture sous dictée), pour en dériver des conclusions sur l'architecture fonctionnelle des processus cognitifs qui régissent la production du langage chez l'adulte sain, le patient cérébro-lésé ou encore l'enfant au cours de l'apprentissage.

I.2. La question des déterminants centraux des processus périphériques et moteurs de l'écriture

Tout au long de ce travail nous avons utilisé des mesures relatives à l'exécution motrice (i.e. vitesse d'écriture, pression, longueur du tracé), en tant qu'indication du bon déroulement des processus périphériques d'écriture en général, pour tenter d'y détecter des indices des processus centraux sous-jacents. Nous avons obtenu des résultats suggérant que certains graphèmes étaient produits avec une vitesse diminuée lorsqu'ils faisaient partie d'une unité orthographique inconsistante. Roux et al. (2013), qui avaient davantage contrôlé l'identité des lettres entre les mots consistants et inconsistants, ont montré qu'une même lettre initiale pouvait en effet être écrite avec une vitesse inférieure (durée d'écriture en moyenne inférieure, à nombre de traits égaux) lorsque celle-ci était incluse dans ou précédait directement une séquence inconsistante (uniquement si celle-ci était positionnée au début du mot). Si de telles mesures permettent bien de révéler la répercussion d'un conflit phono-orthographique central, il est envisageable d'identifier de tels effets de manière plus détaillée en extrayant la vitesse d'écriture de mêmes lettres ou de groupes de lettres selon différents contextes de production : à l'intérieur de séquences irrégulières ou régulières par exemple (Kandel & Spinelli, 2010 ont par exemple montré qu'une même lettre était produite plus lentement lorsqu'elle est présente au sein d'un graphème complexe, composé de plusieurs lettres). Les processus centraux se déroulant dans le temps, il est aussi nécessaire de clarifier le moment auquel une éventuelle perturbation périphérique survient : par exemple au moment de la production de la séquence irrégulière, où qu'elle soit située dans le mot, ou après un délai limité reflétant la résolution de la procédure de conversion phonème-graphème. Le paradigme d'interférence mot-image (utilisé à l'écrit par Bonin & Fayol, 2000; Damian & Stadthagen-Gonzalez, 2009; ou Zhang & Damian, 2010) qui permet, en variant le délai de présentation entre les deux stimuli (le SOA) ainsi que la nature du lien (sémantique, orthographique, phonologique) entre ceux-ci, d'observer

des effets de perturbation sur les latences et donc de déduire une certaine organisation temporelle des différents étapes de traitement centrales pourrait être davantage utilisé pour étudier le déroulement des étapes périphériques impliquées dans l'exécution motrice elle-même. Certaines méthodologies permettant l'étude des relations entre le geste d'écriture et les mouvements oculaires, en tâche de copie par exemple, sont aussi de bons moyens de mettre en évidence les aspects parallèles de l'exécution des processus de la production écrite (Alamargot et al., 2006; Chesnet & Alamargot, 2005; Lambert, Alamargot, Larocque, & Caporossi, 2011) et qui méritent d'être davantage développés.

II. DEVELOPPER LES METHODES D'ETUDE DE LA NEUROANATOMIE DE L'ECRITURE

II.1. Etudier l'écriture en IRMf

Lors de nos travaux de neuroimagerie, nous avons rencontré certaines difficultés qui nécessitent d'être dépassées. Il nous est en particulier apparu que l'écriture est une tâche qu'il n'est si simple de détacher de sa composante motrice, par un simple paradigme de soustraction utilisant une tâche contrôle motrice. La simple perception de caractères graphiques, en particulier s'il s'agit d'écriture manuscrite, suffit bien souvent à entraîner des activations détectables dans les aires prémotrices de l'écriture ainsi que le cortex moteur primaire (Heimann, Umiltà, & Gallese, 2013; Longcamp et al., 2003; Longcamp, Anton, Roth, & Velay, 2005; Longcamp et al., 2006; Wamain et al., 2012). Ainsi, le contrôle de l'exécution motrice fait partie intégrante de cette compétence ; la frontière est floue entre processus périphériques spécifiques de l'écriture (schèmes moteurs correspondant aux formes des lettres) et processus de motricité fine en général (tels qu'impliqués dans le dessin). Nous nous devons d'avoir à l'esprit cette limite lors de la mise en place d'expérimentations en neuroimagerie ; une tâche contrôle trop couteuse au niveau moteur est susceptible de faire manquer l'information relative aux processus périphériques d'écriture quand une tâche contrôle trop peu couteuse est susceptible de confondre ceux-ci avec de simples commandes neuromusculaires.

Le choix de la tâche contrôle motrice est important pour l'identification des processus linguistiques centraux d'écriture mais comme nous l'avons déjà évoqué, leur déroulement temporel rapide constitue probablement aussi une nouvelle limite à leur détection en IRMf. Alors que l'identification du stimulus et la récupération de la représentation orthographique est susceptible de se produire en quelques centaines de millisecondes, ce que l'on peut considérer comme un évènement ponctuel, la production manuscrite se déroule de manière continue et

soutenue pendant plusieurs secondes. Certaines techniques d'analyse du signal IRMf permettent déjà de contrer ce type de difficultés (e.g. utilisant des régresseurs différents pour chaque événement dans chaque essai, dans un design événementiel) mais nous considérons que des tâches linguistiques cognitivement plus coûteuses devraient permettre d'accentuer l'activation et donc faciliter la détection de ces aires langagières orthographiques impliquées dans la production écrite.

Un autre biais potentiel que nous avons déjà évoqué et qui nécessiterait d'être abordé davantage est l'implication des aires du contrôle visuo-attentionnel dans l'écriture. Lorsque nous écrivons, nos yeux réalisent de nombreuses et fréquentes saccades vers la main, vers le tracé produit, éventuellement vers le texte que nous sommes en train de copier (Gowen & Miall, 2006). Ce rôle de l'attention visuelle est généralement peu pris en compte dans les études de neuroimagerie de l'écriture, il est simplement contrôlé en demandant aux participants de conserver leur regard fixe. Pourtant, le réseau visuo-attentionnel fronto-pariétal bilatéral (à dominance hémisphérique droite ; Corbetta, 1998; Corbetta & Shulman, 2002) semble comprendre d'importantes similitudes avec le réseau fronto-pariétal gauche de l'écriture. La GMFA en particulier, au niveau prémoteur supérieur apparaît très proche des champs oculomoteurs frontaux (FEF, *frontal eye fields* ; Paus, 1996). Cette question a précédemment été abordée par Matsuo et al. (2003) qui sont parvenus à dissocier fonctionnellement et anatomiquement, en utilisant une tâche de saccades oculaires, l'« aire d'Exner » (correspondant en réalité plutôt à l'aire prémotrice ventrale de l'écriture) et le FEF. De nouveaux travaux sont ainsi requis pour comparer les contributions communes ou distinctes du cortex frontal supérieur et du cortex pariétal supérieur dans les tâches d'écriture et d'attention visuelle.

II.2. Apports futurs de la technique de TMS

Les caractéristiques du protocole de rTMS que nous avons utilisé lors de ce travail (stimulation inhibitrice 1 Hz *offline*, pendant 20 minutes), qui constituait une première approche, l'écriture n'ayant été que très rarement étudiée chez le sujet sain par cette technique, étaient choisies à la fois pour des raisons de sûreté et parce que ce type de protocole a montré son efficacité pour affecter le comportement dans une variété de tâches cognitives (attention : Hilgetag et al., 2001; prise de décision : Knoch, Pascual-Leone, Meyer, Treyer, & Fehr, 2006; mémoire de travail : Mottaghy, Gangitano, Sparing, Krause, & Pascual-Leone, 2002). Pourtant les potentialités de la TMS sont loin de se limiter à ce type de stimulation et les travaux futurs permettront probablement d'obtenir des résultats sur le rôle fonctionnel des aires du réseau de l'écriture manuscrite de manière plus nette que ceux que nous avons obtenus ici. Les effets et les

potentiels effets indésirables de la stimulation rTMS haute fréquence, excitatrice, ou de la TBS (stimulation théta-burst, procédant par trains d'impulsions rapprochées) sont beaucoup mieux compris et contrôlés que cela n'était le cas lors des débuts de l'utilisation de cette technique (Huang, Chen, Rothwell, & Wen, 2007; Huang, Edwards, Rounis, Bhatia, & Rothwell, 2005). L'application des techniques de TMS aux pathologies, agraphies et dysgraphies, affectant la production écrite en sont là encore à leur débuts et il ne faut pas négliger le potentiel de remédiation qu'elles offrent pour un vaste éventail de pathologies ou de troubles cognitifs (pour une revue, voir Lefaucheur et al., 2011).

Une fois surmontées certaines difficultés pratiques quant à sa mise en place, l'utilisation de la TMS *simple pulse* (ou *double pulse*) dans l'écriture en tant qu'outil de « chronométrie mentale » pourra aussi être utilisée pour tester des hypothèses sur le déroulement temporel de l'activation au sein du réseau de l'écriture, voire de tester certaines des hypothèses que nous avons abordées lors des études de psycholinguistique de ce travail. Par exemple, si la conversion phonème-graphème est un processus séquentiel relativement étendu dans le temps, le moment auquel une impulsion TMS sera déclenchée (au niveau d'une aire justement dédiée à ce processus) pourra déterminer des effets différents. On peut aussi proposer la prédiction qu'une perturbation par une impulsion TMS d'une aire dédiée à la récupération de la représentation lexicale (e.g. PITC), à un moment précis après la présentation d'un stimulus, entraînera une plus grande influence phonologique sur la réponse écrite produite. Les effets en temps réel testés lors de ce type de stimulation nous semblent en outre plus facilement directement attribuables à l'aire ciblée plutôt qu'à des effets à distance intervenant dans ce vaste réseau interconnecté recruté lors de la production écrite.

II.3. Écriture et connectivité

D'importants progrès ont été réalisés dans l'identification et la localisation, par les techniques de neuroimagerie des aires cérébrales de l'écriture. Cette identification n'est pourtant qu'une première étape dans la compréhension des mécanismes cérébraux permettant de faire émerger le comportement que l'on observe. Les fonctions d'écriture et plus largement du langage sont organisées sous la forme de réseaux d'aires interconnectées anatomiquement et interagissant entre elles. Certaines techniques, de connectivité fonctionnelle et de connectivité effective, permettent de dévoiler l'architecture de tels réseaux et de mettre en évidence les influences fonctionnelles respectives entre différentes aires (méthode DCM, *dynamic causal modelling* ; Friston, Harrison, & Penny, 2003). De telles méthodes sont en outre susceptibles de bénéficier de techniques de tractographie, visant à révéler les faisceaux de substance blanche

reliant anatomiquement ces différentes aires (voir par exemple Saur et al., 2010 ; pour une combinaison de techniques de connectivité anatomique et fonctionnelle). L'état actuel de nos connaissances concernant l'anatomie fonctionnelle de l'écriture nous permet en effet de proposer certaines hypothèses sur les liens fonctionnels unissant différentes aires corticales selon le processus considéré et donc d'envisager prochainement de tester celles-ci par des méthodes de connectivité (ce qui commence d'ailleurs à être fait : Segal & Petrides, 2012).

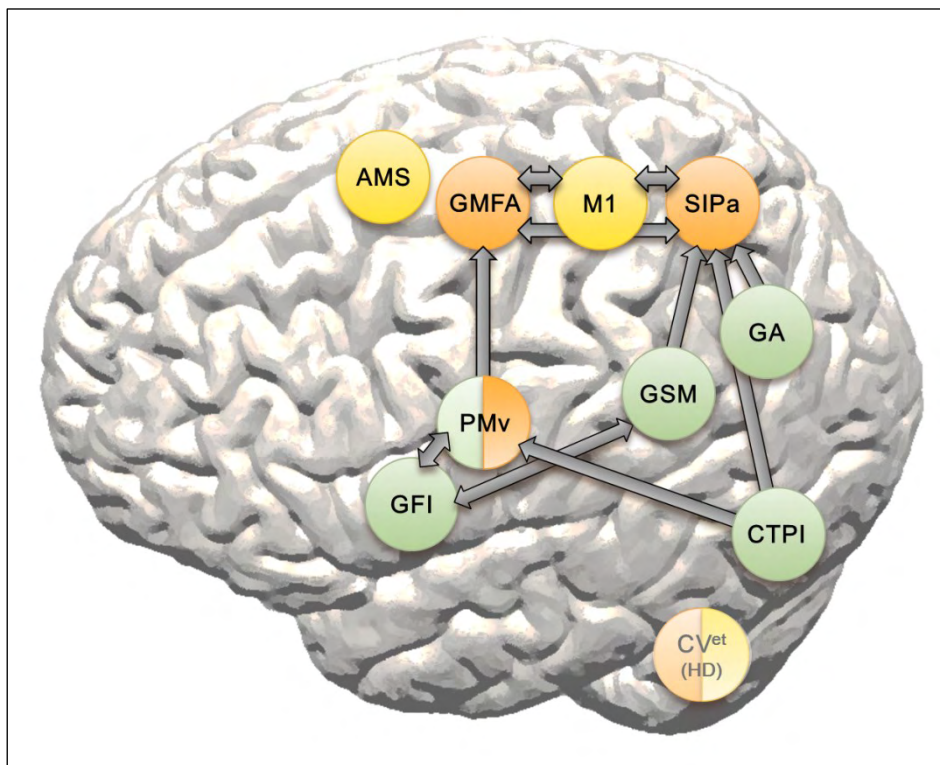


Figure XI-1 : Proposition d'un modèle de connectivité fonctionnelle entre les différentes aires impliquées dans les processus d'écriture. Les aires représentées en vert pâle représentent les processus centraux (phonologiques et orthographiques), en jaune les processus du contrôle et de l'exécution motrice et en orange les processus périphériques intermédiaires ou d'interface (post-orthographiques). AMS, aire motrice supplémentaire ; GMFA, *graphemic/motor frontal area* ; M1, cortex moteur primaire ; SIPa, sillon intrapariétal antérieur (ou aire PE) ; GA, gyrus angulaire ; GSM, gyrus supramarginal ; PMv, cortex prémoteur ventral ; GFI, gyrus frontal inférieur ; CTPI, cortex temporal postérieur inférieur ; CVet (HD), cervelet droit.

La Figure XI-1 ci-dessus propose un tel modèle de connectivité, non exhaustif, composé de connexions uni- et bidirectionnelles, tentant d'intégrer la majorité des aires corticales de l'hémisphère dominant connues pour être impliquées dans l'écriture. Nous avons tenté d'y intégrer les hypothèses issues des résultats que nous avons pu obtenir tout au long de nos investigations. Nous proposons ainsi par exemple des interactions fonctionnelles de la GMFA avec le CPS (sillon intrapariétal antérieur, SIPa) et l'aire motrice primaire, mais aussi avec la région prémotrice ventrale. Cette dernière aurait un rôle situé à l'interface avec des aires plus langagières dédiées à la conversion phonème-graphème telles que la pars opercularis du gyrus frontal inférieur (aire de Broca) puis le gyrus supramarginal, ou dédiées à la récupération de la

représentation orthographique ou de la forme visuelle du mot comme le cortex temporal postérieur-inférieur (éventuellement le gyrus angulaire). L'aire du SIPa interagirait avec ou recevrait des entrées en provenance des aires langagières pariétales inférieures et interagirait avec les aires plutôt dédiées à l'exécution motrice.

Les techniques d'électro-encéphalographie ou de magnétoencéphalographie ont encore été elles aussi trop peu utilisées pour étudier la dynamique de l'activation cérébrale lorsqu'une tâche d'écriture est réalisée (voir cependant Baus, Strijkers, & Costa, 2013; Perret & Laganaro, 2012). Le développement de nouvelles techniques ou de méthodes d'analyse de la connectivité permet aujourd'hui de plus en plus d'accéder à des informations non seulement sur la dynamique de l'activation mais aussi sur la dynamique de connectivité effective au sein du réseau étudié (e.g. EEG haute densité, EEG intracrânien ; Bedo, Ribary, & Ward, 2014; Vidal et al., 2012). Toutes ces méthodes offrent une très bonne résolution temporelle, que l'IRMf seule ne permet pas (quoique certains développements récents nous amènent à nuancer ce point, voir Boyacioglu & Barth, 2013) et pourront probablement à l'avenir être davantage mises à profit. Les travaux futurs devront en effet œuvrer vers la compréhension d'un réseau cérébral distribué et dynamique : si la recherche du centre cérébral de l'écriture constitue une problématique importante et un point de départ nécessaire pour nos investigations, nous avons vu tout au long de notre travail que la tâche, en apparence si simple pour les scripteurs experts que nous sommes, consistant à transcrire une idée sur le papier grâce à des signes abstraits, implique la mobilisation coordonnée de tout un ensemble de compétences cognitives et implique un vaste ensemble de régions du cerveau via des mécanismes qui restent encore pour une grande part à élucider.

REFERENCES

- Alamargot, D., Chesnet, D., Dansac, C., & Ros, C. (2006). Eye and pen: A new device for studying reading during writing. *Behavior Research Methods*, *38*(2), 287-299.
- Alario, F. X., Chainay, H., Lehericy, S., & Cohen, L. (2006). The role of the supplementary motor area (SMA) in word production. *Brain Research*, *1076*, 129-143. doi: DOI 10.1016/j.brainres.2005.11.104
- Alario, F. X., & Ferrand, L. (1999). A set of 400 pictures standardized for French: norms for name agreement, image agreement, familiarity, visual complexity, image variability, and age of acquisition. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, *31*(3), 531-552.
- Alexander, M. P., Fischer, R. S., & Friedman, R. (1992a). Lesion localization in apractic agraphia. *Archives of Neurology*, *49*(3), 246-251.
- Alexander, M. P., Friedman, R. B., Loverso, F., & Fischer, R. S. (1992b). Lesion localization of phonological agraphia. *Brain and Language*, *43*(1), 83-95.
- Alexander, M. P., Hiltbrunner, B., & Fischer, R. S. (1989). Distributed anatomy of transcortical sensory aphasia. *Archives of Neurology*, *46*(8), 885-892.
- Allen, E. A., Erhardt, E. B., Wei, Y. H., Eichele, T., & Calhoun, V. D. (2012). Capturing inter-subject variability with group independent component analysis of fMRI data: A simulation study. *NeuroImage*, *59*(4), 4141-4159. doi: DOI 10.1016/j.neuroimage.2011.10.010
- Álvarez, C. J., Cottrell, D., & Afonso, O. (2009). Writing dictated words and picture names: Syllabic boundaries affect execution in Spanish. *Applied Psycholinguistics*, *30*(02), 205-223.
- Andersen, R. A., Snyder, L. H., Bradley, D. C., & Xing, J. (1997). Multimodal representation of space in the posterior parietal cortex and its use in planning movements. *Annual Review of Neuroscience*, *20*, 303-330.
- Anderson, S. W., Damasio, A. R., & Damasio, H. (1990). Troubled letters but not numbers. Domain specific cognitive impairments following focal damage in frontal cortex. *Brain*, *113* (Pt 3), 749-766.
- Andoh, J., Artiges, E., Pallier, C., Rivière, D., Mangin, J. F., Cachia, A., . . . Martinot, J. L. (2006). Modulation of language areas with functional MR image-guided magnetic stimulation. *NeuroImage*, *29*(2), 619-627.
- Andrews, S. (1997). The effect of orthographic similarity on lexical retrieval: Resolving neighborhood conflicts. *Psychonomic Bulletin & Review*, *4*(4), 439-461.
- Auerbach, S. H., & Alexander, M. P. (1981). Pure agraphia and unilateral optic ataxia associated with a left superior parietal lobule lesion. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, *44*(5), 430-432.
- Baayen, R. H. (2004). Statistics in psycholinguistics: A critique of some current gold standards. *Mental lexicon working papers*, *1*(1), 1-47.
- Baayen, R. H., Davidson, D. J., & Bates, D. M. (2008). Mixed-effects modeling with crossed random effects for subjects and items. *Journal of Memory and Language*, *59*(4), 390-412. doi: DOI 10.1016/j.jml.2007.12.005
- Baayen, R. H., & Milin, P. (2010). Analyzing reaction times. *International Journal of Psychological Research*, *3*(2), 12-28.
- Baddeley, A. (2003). Working memory: looking back and looking forward. *Nature Reviews Neuroscience*, *4*(10), 829-839.
- Badecker, W., Hillis, A., & Caramazza, A. (1990). Lexical morphology and its role in the writing process: Evidence from a case of acquired dysgraphia. *Cognition*, *35*(3), 205-243.
- Balasubramanian, V., & Cohen, H. (2014). Cognitive neuropsychological analysis of isolated agraphia: Review and report of a new case. *Journal of Neurolinguistics*, *28*, 48-62.
- Barry, C., Hirsh, K. W., Johnston, R. A., & Williams, C. L. (2001). Age of acquisition, word frequency, and the locus of repetition priming of picture naming. *Journal of Memory and Language*, *44*(3), 350-375.

- Barry, C., Morrison, C. M., & Ellis, A. W. (1997). Naming the Snodgrass and Vanderwart pictures: Effects of age of acquisition, frequency, and name agreement. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section A*, *50*(3), 560-585.
- Barry, C., & Seymour, P. H. (1988). Lexical priming and sound-to-spelling contingency effects in nonword spelling. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *40*(1), 5-40.
- Bates, D., & Maechler, M. (2009). lme4: linear mixed-effects models using Eigen and Eigen R package version 0.999375-32.
- Baus, C., Strijkers, K., & Costa, A. (2013). When does word frequency influence written production? *Frontiers in Psychology*, *4*. doi: 10.3389/fpsyg.2013.00963
- Baxter, D. M., & Warrington, E. K. (1985). Category specific phonological dysgraphia. *Neuropsychologia*, *23*(5), 653-666.
- Baxter, D. M., & Warrington, E. K. (1986). Ideational agraphia: a single case study. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, *49*(4), 369-374.
- Beauvois, M. F., & Derouesne, J. (1979). Phonological alexia: three dissociations. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, *42*(12), 1115-1124.
- Beauvois, M. F., & Déroutesné, J. (1981). Lexical or orthographic agraphia. *Brain*, *104*(Pt 1), 21-49.
- Bedo, N., Ribary, U., & Ward, L. M. (2014). Fast Dynamics of Cortical Functional and Effective Connectivity during Word Reading. *PLoS One*, *9*(2), e88940. doi: 10.1371/journal.pone.0088940
- Beeson, P., Rapcsak, S., Plante, E., Chergu, J., Chung, A., Johnson, S., & Trouard, T. (2003). The neural substrates of writing: A functional magnetic resonance imaging study. *Aphasiology*, *17*(6), 647-665.
- Benedikt, M. (1865). *Ueber Aphasie, Agraphie und verwandte pathologische Zustände*.
- Bestmann, S., Baudewig, J., Siebner, H. R., Rothwell, J. C., & Frahm, J. (2005). BOLD MRI responses to repetitive TMS over human dorsal premotor cortex. *NeuroImage*, *28*(1), 22-29. doi: DOI 10.1016/j.neuroimage.2005.05.027
- Bestmann, S., Swayne, O., Blankenburg, F., Ruff, C. C., Haggard, P., Weiskopf, N., . . . Ward, N. S. (2008). Dorsal premotor cortex exerts state-dependent causal influences on activity in contralateral primary motor and dorsal premotor cortex. *Cerebral Cortex*, *18*(6), 1281-1291. doi: DOI 10.1093/cercor/bhm159
- Binder, J. R., Medler, D. A., Westbury, C. F., Liebenthal, E., & Buchanan, L. (2006). Tuning of the human left fusiform gyrus to sublexical orthographic structure. *NeuroImage*, *33*(2), 739-748.
- Black, S. E., Behrmann, M., Bass, K., & Hacker, P. (1989). Selective writing impairment: Beyond the allographic code. *Aphasiology*, *3*(3), 265-277.
- Blank, S. C., Scott, S. K., Murphy, K., Warburton, E., & Wise, R. J. S. (2002). Speech production: Wernicke, Broca and beyond. *Brain*, *125*(Pt 8), 1829-1838.
- Bolger, D. J., Perfetti, C. A., & Schneider, W. (2005). Cross-cultural effect on the brain revisited: universal structures plus writing system variation. *Human Brain Mapping*, *25*(1), 92-104. doi: 10.1002/hbm.20124
- Bonin, M., Fayol, M., & Gombert, J. E. (1998). An experimental study of lexical access in the writing and naming of isolated words. *International Journal of Psychology*, *33*(4), 269-286.
- Bonin, P. (2002). La dénomination écrite de mots à partir d'images. *L'année psychologique*, *102*(2), 321-362.
- Bonin, P. (2003). *Production verbale de mots: approche cognitive*: De Boeck.
- Bonin, P. (2005). Comment accède-t-on à un mot en production verbale écrite? *Psychologie française*, *50*(3), 323-338.
- Bonin, P., Chalard, M., Méot, A., & Fayol, M. (2002). The determinants of spoken and written picture naming latencies. *British Journal of Psychology*, *93*(1), 89-114.
- Bonin, P., Collay, S., & Fayol, M. (2008). La consistance orthographique en production verbale écrite : une brève synthèse. *L'Année psychologique*, *108*, 517-546.

- Bonin, P., Collay, S., Fayol, M., & Méot, A. (2005). Attentional strategic control over nonlexical and lexical processing in written spelling to dictation in adults. *Memory & Cognition*, 33(1), 59-75.
- Bonin, P., & Delattre, M. (2010). La procédure de conversion phonie-graphie en production sous dictée. *Année psychologique*, 110(4), 495.
- Bonin, P., & Fayol, M. (2000). Writing words from pictures: What representations are activated, and when? *Memory & Cognition*, 28(4), 677-689. doi: Doi 10.3758/Bf03201257
- Bonin, P., Fayol, M., & Chalard, M. (2001a). Age of acquisition and word frequency in written picture naming. *Quarterly Journal Of Experimental Psychology Section A-Human Experimental Psychology*, 54(2), 469-489. doi: 10.1080/713755968
- Bonin, P., Fayol, M., & Gombert, J. E. (1997). Role of phonological and orthographic codes in picture naming and writing: An interference paradigm study. *Cahiers De Psychologie Cognitive-Current Psychology of Cognition*, 16(3), 299-324.
- Bonin, P., & Méot, A. (2002). Writing to dictation in real time in adults: What are the determinants of written latencies? In S. P. Shohov (Ed.), *Advances in psychology research* (Vol. 16, pp. 139-165). New York: Nova Science Publishers.
- Bonin, P., Peereman, R., & Fayol, M. (2001b). Do Phonological Codes Constrain the Selection of Orthographic Codes in Written Picture Naming? *Journal of Memory and Language*, 45(4), 688-720.
- Bonin, P., Peereman, R., Malardier, N., Méot, A., & Chalard, M. (2003). A new set of 299 pictures for psycholinguistic studies: French norms for name agreement, image agreement, conceptual familiarity, visual complexity, image variability, age of acquisition, and naming latencies. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 35(1), 158-167.
- Boyacioglu, R., & Barth, M. (2013). Generalized INverse Imaging (GIN): Ultrafast fMRI With Physiological Noise Correction. *Magnetic Resonance in Medicine*, 70(4), 962-971. doi: Doi 10.1002/Mrm.24528
- Brett, M., Anton, J.-L., Valabregue, R., & Poline, J.-B. (2002). *Region of interest analysis using an SPM toolbox* Paper presented at the 8th International Conference on Functional Mapping of the Human Brain, Sendai, Japan.
- Broca, P. (1861). Remarque sur le siege de la faculté du langage articulé, suivie d'une observation d'aphémie (perte de la parole). *Bulletin de la société anatomique de Paris*, 36, 330-356.
- Brown, G. D., & Loosemore, R. P. (1994). Computational approaches to normal and impaired spelling. *Handbook of spelling: Theory, process and intervention*, 319-335.
- Brownsett, S. L. E., & Wise, R. J. S. (2010). The contribution of the parietal lobes to speaking and writing. *Cerebral Cortex*, 20(3), 517-523.
- Campbell, R. (1983). Writing nonwords to dictation. *Brain and Language*, 19(1), 153-178.
- Caramazza, A. (1988). Some Aspects of Language Processing Revealed through the Analysis of Acquired Aphasia - the Lexical System. *Annual Review of Neuroscience*, 11, 395-421. doi: DOI 10.1146/annurev.neuro.11.1.395
- Caramazza, A. (1997). How many levels of processing are there in lexical access? *Cognitive Neuropsychology*, 14(1), 177-208. doi: Doi 10.1080/026432997381664
- Caramazza, A., & Miceli, G. (1990). The structure of graphemic representations. *Cognition*, 37(3), 243-297.
- Caramazza, A., Miceli, G., Villa, G., & Romani, C. (1987). The role of the Graphemic Buffer in spelling: evidence from a case of acquired dysgraphia. *Cognition*, 26(1), 59-85.
- Caspers, S., Geyer, S., Schleicher, A., Mohlberg, H., Amunts, K., & Zilles, K. (2006). The human inferior parietal cortex: cytoarchitectonic parcellation and interindividual variability. *NeuroImage*, 33(2), 430-448. doi: 10.1016/j.neuroimage.2006.06.054
- Chen, R., Gerloff, C., Classen, J., Wassermann, E. M., Hallett, M., & Cohen, L. G. (1997). Safety of different inter-train intervals for repetitive transcranial magnetic stimulation and recommendations for safe ranges of stimulation parameters. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 105(6), 415-421.

- Chesnet, D., & Alamargot, D. (2005). Analyse en temps réel des activités oculaires et graphomotrices du scripteur : intérêt du dispositif « Eye and Pen ». *L'année psychologique*, *105*(3), 477-520.
- Chouinard, P. A., Van Der Werf, Y. D., Leonard, G., & Paus, T. (2003). Modulating neural networks with transcranial magnetic stimulation applied over the dorsal premotor and primary motor cortices. *Journal of Neurophysiology*, *90*(2), 1071-1083. doi: 10.1152/jn.01105.2002
- Clark, H. H. (1973). The language-as-fixed-effect fallacy: A critique of language statistics in psychological research. *Journal of verbal learning and verbal behavior*, *12*(4), 335-359.
- Cloutman, L., Gingsis, L., Newhart, M., Davis, C., Heidler-Gary, J., Crinion, J., & Hillis, A. E. (2009). A neural network critical for spelling. *Annals of Neurology*, *66*(2), 249-253.
- Cohen, L., Dehaene, S., Naccache, L., Lehéricy, S., Dehaene-Lambertz, G., Hénaff, M. A., & Michel, F. (2000). The visual word form area: spatial and temporal characterization of an initial stage of reading in normal subjects and posterior split-brain patients. *Brain*, *123* (Pt 2), 291-307.
- Coltheart, M., Curtis, B., Atkins, P., & Haller, M. (1993). Models of reading aloud: Dual-route and parallel-distributed-processing approaches. *Psychological Review*, *100*(4), 589.
- Coltheart, M., & Rastle, K. (1994). Serial Processing in Reading Aloud - Evidence for Dual-Route Models of Reading. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, *20*(6), 1197-1211. doi: Doi 10.1037/0096-1523.20.6.1197
- Coltheart, M., Rastle, K., Perry, C., Langdon, R., & Ziegler, J. (2001). DRC: a dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological Review*, *108*(1), 204-256.
- Content, A., Mousty, P., & Radeau, M. (1990). Brulex - a Computerized Lexical Data-Base for the French-Language. *Année psychologique*, *90*(4), 551-566.
- Corbetta, M. (1998). Frontoparietal cortical networks for directing attention and the eye to visual locations: identical, independent, or overlapping neural systems? *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *95*(3), 831-838.
- Corbetta, M., & Shulman, G. L. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, *3*(3), 201-215.
- Costanzo, F., Menghini, D., Caltagirone, C., Oliveri, M., & Vicari, S. (2012). High frequency rTMS over the left parietal lobule increases non-word reading accuracy. *Neuropsychologia*, *50*(11), 2645-2651.
- Croisile, B., Trillet, M., Laurent, B., Latombe, D., & Schott, B. (1989). Agraphie lexicale par hématome temporo-pariétal gauche. *Rev Neurol (Paris)*, *145*(4), 287-292.
- Crosson, B., McGregor, K., Gopinath, K. S., Conway, T. W., Benjamin, M., Chang, Y.-L., . . . White, K. D. (2007). Functional MRI of language in aphasia: a review of the literature and the methodological challenges. *Neuropsychology Review*, *17*(2), 157-177.
- Cubelli, R. (1991). A selective deficit for writing vowels in acquired dysgraphia. *Nature*, *353*(6341), 258-260. doi: 10.1038/353258a0
- Cuetos, F., & Labos, E. (2001). The autonomy of the orthographic pathway in a shallow language: Data from an aphasic patient. *Aphasiology*, *15*(4), 333-342.
- Cui, X., Li, J., & Song, X. (2011). xjview: a viewing program for SPM, from <http://www.alivelearn.net/xjview8/>
- Cutting, J. C., & Ferreira, V. S. (1999). Semantic and phonological information flow in the production lexicon. *Journal of Experimental Psychology. Learning, Memory, and Cognition*, *25*(2), 318-344.
- Damian, M. F. (2003). Articulatory duration in single-word speech production. *Journal of Experimental Psychology. Learning, Memory, and Cognition*, *29*(3), 416-431.
- Damian, M. F., & Stadthagen-Gonzalez, H. (2009). Advance planning of form properties in the written production of single and multiple words. *Language and Cognitive Processes*, *24*(4), 555-579.
- Daniels, P. T. (1996). The Study of Writing Systems *The World's Writing Systems*. New York: Oxford University Press.

- De Bastiani, P., & Barry, C. (1989). A cognitive analysis of an acquired dysgraphic patient with an "allographic" writing disorder. *Cognitive Neuropsychology*, 6(1), 25-41.
- De Moor, W., Ghyselinck, M., & Brysbaert, M. (2000). A validation study of the age-of-acquisition norms collected by Ghyselinck, De Moor, & Brysbaert. *Psychologica Belgica*, 40(2), 99-114.
- Dehaene, S., Cohen, L., Sigman, M., & Vinckier, F. (2005). The neural code for written words: a proposal. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(7), 335-341.
- Dehaene, S., Le Clec'H, G., Poline, J.-B., Le Bihan, D., & Cohen, L. (2002). The visual word form area: a prelexical representation of visual words in the fusiform gyrus. *Neuroreport*, 13(3), 321-325.
- Deiber, M. P., Ibañez, V., Honda, M., Sadato, N., Raman, R., & Hallett, M. (1998). Cerebral processes related to visuomotor imagery and generation of simple finger movements studied with positron emission tomography. *NeuroImage*, 7(2), 73-85.
- Dejerine, J. (1891). Sur un cas de cécité verbale avec agraphie, suivi d'autopsie. *CR Société du Biologie*, 43, 197-201.
- Delattre, M., Bonin, P., & Barry, C. (2006). Written spelling to dictation: Sound-to-spelling regularity affects both writing latencies and durations. *Journal of Experimental Psychology. Learning, Memory, and Cognition*, 32(6), 1330-1340.
- Démonet, J.-F., Thierry, G., & Cardebat, D. (2005). Renewal of the neurophysiology of language: functional neuroimaging. *Physiological Reviews*, 85(1), 49-95.
- Devlin, J. T., Matthews, P. M., & Rushworth, M. F. S. (2003). Semantic processing in the left inferior prefrontal cortex: a combined functional magnetic resonance imaging and transcranial magnetic stimulation study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(1), 71-84.
- Di Pietro, M., Schnider, A., & Ptak, R. (2011). Peripheral dysgraphia characterized by the co-occurrence of case substitutions in uppercase and letter substitutions in lowercase writing. *Cortex*, 47(9), 1038-1051. doi: 10.1016/j.cortex.2010.10.005
- Djioua, M., & Plamondon, R. (2009). Studying the variability of handwriting patterns using the Kinematic Theory. *Human Movement Science*, 28(5), 588-601. doi: DOI 10.1016/j.humov.2009.01.005
- Dronkers, N. F., Wilkins, D. P., Van Valin, R. D., Jr., Redfern, B. B., & Jaeger, J. J. (2004). Lesion analysis of the brain areas involved in language comprehension. *Cognition*, 92(1-2), 145-177.
- Eickhoff, S. B., Laird, A. R., Grefkes, C., Wang, L. E., Zilles, K., & Fox, P. T. (2009). Coordinate-based activation likelihood estimation meta-analysis of neuroimaging data: a random-effects approach based on empirical estimates of spatial uncertainty. *Human Brain Mapping*, 30(9), 2907-2926.
- Ellis, A. W. (1982). Spelling and writing (and reading and speaking). In A. W. Ellis (Ed.), *Normality and pathology in cognitive functions* (pp. 113-146). London: Academic Press.
- Ellis, A. W. (1988). Spelling and writing. In A. W. Ellis & A. W. Young (Eds.), *Human cognitive neuropsychology*. Hove, UK: Lawrence Erlbaum Associates Ltd.
- Ellis, A. W., Kay, J., & Franklin, S. (1992). Anomia: Differentiating between semantic and phonological deficits. *Cognitive neuropsychology in clinical practice*, 207-228.
- Ellis, A. W., & Lambon Ralph, M. A. (2000). Age of acquisition effects in adult lexical processing reflect loss of plasticity in maturing systems: Insights from connectionist networks. *Journal of Experimental Psychology. Learning, Memory, and Cognition*, 26(5), 1103.
- Exner, S. (1881). *Untersuchungen über die Localisation der Functionen in der Grosshirnrinde des Menschen*: Braumüller.
- Ferrand, L. (1997). La dénomination d'objets: Théories et données. *L'année psychologique*, 97(1), 113-146.
- Ferrand, L. (2002). Les modèles de la production de la parole. *Production du langage. Traité des sciences cognitives*, 27-44.
- Fierro, B., Brighina, F., Oliveri, M., Piazza, A., La Bua, V., Buffa, D., & Bisiach, E. (2000). Contralateral neglect induced by right posterior parietal rTMS in healthy subjects. *Neuroreport*, 11(7), 1519-1521.

- Folk, J. R., Rapp, B., & Goldrick, M. (2002). The interaction of lexical and sublexical information in spelling: What's the point? *Cognitive Neuropsychology*, *19*(7), 653-671.
- Folstein, M. F., Folstein, S. E., & McHugh, P. R. (1975). "Mini-mental state". A practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician. *Journal of Psychiatric Research*, *12*(3), 189-198.
- Fox, M. D., Snyder, A. Z., Vincent, J. L., Corbetta, M., Van Essen, D. C., & Raichle, M. E. (2005). The human brain is intrinsically organized into dynamic, anticorrelated functional networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *102*(27), 9673-9678.
- Friedman, R. B., & Hadley, J. A. (1992). Letter-by-letter surface alexia. *Cognitive Neuropsychology*, *9*(3), 185-208.
- Friston, K. J., Buechel, C., Fink, G. R., Morris, J., Rolls, E., & Dolan, R. J. (1997). Psychophysiological and modulatory interactions in neuroimaging. *NeuroImage*, *6*(3), 218-229. doi: 10.1006/nimg.1997.0291
- Friston, K. J., Harrison, L., & Penny, W. (2003). Dynamic causal modelling. *NeuroImage*, *19*(4), 1273-1302.
- Friston, K. J., Holmes, A. P., Worsley, K. J., Poline, J. P., Frith, C. D., & Frackowiak, R. S. J. (1994). Statistical parametric maps in functional imaging: A general linear approach. *Human Brain Mapping*, *2*(4), 189-210. doi: 10.1002/hbm.460020402
- Gainotti, G., & Tiacci, C. (1970). Patterns of drawing disability in right and left hemispheric patients. *Neuropsychologia*, *8*(3), 379-384.
- Gangadhar, G., Joseph, D., Srinivasan, A. V., Subramanian, D., Shivakeshavan, R. G., Shobana, N., & Chakravarthy, V. S. (2009). A computational model of Parkinsonian handwriting that highlights the role of the indirect pathway in the basal ganglia. *Human Movement Science*, *28*(5), 602-618. doi: DOI 10.1016/j.humov.2009.07.008
- Ganushchak, L. Y., Christoffels, I. K., & Schiller, N. O. (2011). The use of electroencephalography in language production research: a review. *Frontiers in Psychology*, *2*.
- Georgopoulos, A. P., Ashe, J., Smyrnis, N., & Taira, M. (1992). The motor cortex and the coding of force. *Science*, *256*(5064), 1692-1695.
- Geschwind, N. (1969). *Problems in the anatomical understanding of aphasia*. Chicago: University of Chicago Press.
- Glover, S., Miall, R. C., & Rushworth, M. F. (2005). Parietal rTMS disrupts the initiation but not the execution of on-line adjustments to a perturbation of object size. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *17*(1), 124-136. doi: 10.1162/0898929052880066
- Goldstein, K. (1948). Language and language disturbances; aphasic symptom complexes and their significance for medicine and theory of language.
- Goodglass, H. (1993). *Understanding aphasia*. San Diego: Academic Press.
- Goodman-Schulman, R., & Caramazza, A. (1987). Patterns of dysgraphia and the nonlexical spelling process. *Cortex*, *23*(1), 143-148.
- Goodman, R. A., & Caramazza, A. (1986). Aspects of the spelling process: Evidence from a case of acquired dysgraphia. *Language and Cognitive Processes*, *1*(4), 263-296.
- Gowen, E., & Miall, R. C. (2006). Eye-hand interactions in tracing and drawing tasks. *Human Movement Science*, *25*(4-5), 568-585. doi: 10.1016/j.humov.2006.06.005
- Grainger, J., Rey, A., & Dufau, S. (2008). Letter perception: from pixels to pandemonium. *Trends in Cognitive Sciences*, *12*(10), 381-387. doi: 10.1016/j.tics.2008.06.006
- Guinet, E., & Kandel, S. (2010). Ductus: A software package for the study of handwriting production. *Behavior Research Methods*, *42*(1), 326-332.
- Gusnard, D. A., & Raichle, M. E. (2001). Searching for a baseline: functional imaging and the resting human brain. *Nature Reviews Neuroscience*, *2*(10), 685-694.
- Harm, M. W., & Seidenberg, M. S. (2001). Are there orthographic impairments in phonological dyslexia? *Cognitive Neuropsychology*, *18*(1), 71-92.
- Harm, M. W., & Seidenberg, M. S. (2004). Computing the meanings of words in reading: cooperative division of labor between visual and phonological processes. *Psychological Review*, *111*(3), 662.

- Harrington, G. S., Farias, D., Davis, C. H., & Buonocore, M. H. (2007). Comparison of the neural basis for imagined writing and drawing. *Human Brain Mapping, 28*(5), 450-459.
- Heilman, K. M., Coyle, J. M., Gonyea, F., & Geschwind, N. (1973). Apraxia and agraphia in a left-hander. *Brain*.
- Heilman, K. M., Gonyea, E. F., & Geschwind, N. (1974). Apraxia and agraphia in a right-hander. *Cortex, 10*(3), 284-288.
- Heimann, K., Umiltà, M. A., & Gallese, V. (2013). How the motor-cortex distinguishes among letters, unknown symbols and scribbles. A high density EEG study. *Neuropsychologia, 51*(13), 2833-2840. doi: DOI 10.1016/j.neuropsychologia.2013.07.014
- Henry, M. L., Beeson, P. M., Stark, A. J., & Rapcsak, S. Z. (2007). The role of left perisylvian cortical regions in spelling. *Brain and Language, 100*(1), 44-52. doi: 10.1016/j.bandl.2006.06.011
- Hickok, G. (2009). The functional neuroanatomy of language. *Physics of Life Reviews, 6*(3), 121-143.
- Hilgetag, C. C., Theoret, H., & Pascual-Leone, A. (2001). Enhanced visual spatial attention ipsilateral to rTMS-induced 'virtual lesions' of human parietal cortex. *Nature Neuroscience, 4*(9), 953-957. doi: 10.1038/nn0901-953
- Hillis, A. E., & Caramazza, A. (1989). The graphemic buffer and attentional mechanisms. *Brain and Language, 36*(2), 208-235.
- Hillis, A. E., & Caramazza, A. (1991). Mechanisms for accessing lexical representations for output: evidence from a category-specific semantic deficit. *Brain and Language, 40*(1), 106-144.
- Hillis, A. E., Rapp, B. C., & Caramazza, A. (1999). When a rose is a rose in speech but a tulip in writing. *Cortex, 35*(3), 337-356.
- Hodges, J. R. (1991). Pure Apraxic Agraphia with Recovery after Drainage of a Left Frontal Cyst. *Cortex, 27*(3), 469-473.
- Hodsoll, J., Mevorach, C., & Humphreys, G. W. (2009). Driven to less distraction: rTMS of the right parietal cortex reduces attentional capture in visual search. *Cerebral Cortex, 19*(1), 106-114.
- Holm, S. (1979). A Simple Sequentially Rejective Multiple Test Procedure. *Scandinavian Journal of Statistics, 6*(2), 65-70.
- Holmes, V. M., & Carruthers, J. (1998). The relation between reading and spelling in skilled adult readers. *Journal of Memory and Language, 39*(2), 264-289. doi: DOI 10.1006/jmla.1998.2583
- Horovitz, S. G., Gallea, C., Najee-ullah, M. A., & Hallett, M. (2013). Functional Anatomy of Writing with the Dominant Hand. *PloS One, 8*(7). doi: 10.1371/journal.pone.0067931
- Houghton, G., & Zorzi, M. (2003). Normal and impaired spelling in a connectionist dual-route architecture. *Cognitive Neuropsychology, 20*(2), 115-162. doi: Doi 10.1080/02643290242000871
- Huang, Y.-Z., Chen, R.-S., Rothwell, J. C., & Wen, H.-Y. (2007). The after-effect of human theta burst stimulation is NMDA receptor dependent. *Clinical Neurophysiology: Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology, 118*(5), 1028-1032.
- Huang, Y.-Z., Edwards, M. J., Rounis, E., Bhatia, K. P., & Rothwell, J. C. (2005). Theta burst stimulation of the human motor cortex. *Neuron, 45*(2), 201-206.
- Huettel, S. A., Song, A. W., & McCarthy, G. (2004). *Functional magnetic resonance imaging* (Vol. 1): Sinauer Associates Sunderland, MA.
- Humphreys, G. W., Lamote, C., & Lloydjones, T. J. (1995). An Interactive Activation Approach to Object Processing - Effects of Structural Similarity, Name Frequency, and Task in Normality and Pathology. *Memory, 3*(3-4), 535-586. doi: Doi 10.1080/09658219508253164
- Humphreys, G. W., & Riddoch, M. J. (1987). *To see but not to see: A case study of visual agnosia*: Psychology Press.
- Humphreys, G. W., Riddoch, M. J., & Quinlan, P. T. (1988). Cascade processes in picture identification. *Cognitive Neuropsychology, 5*(1), 67-104.
- Jaffré, J.-P., & Fayol, M. (1997). *Orthographe: Des systèmes aux usages*: Flammarion.

- Jared, D., McRae, K., & Seidenberg, M. S. (1990). The basis of consistency effects in word naming. *Journal of Memory and Language*, 29(6), 687-715.
- Jescheniak, J. D., & Levelt, W. J. (1994). Word frequency effects in speech production: Retrieval of syntactic information and of phonological form. *Journal of Experimental Psychology. Learning, Memory, and Cognition*, 20(4), 824.
- Jobard, G., Crivello, F., & Tzourio-Mazoyer, N. (2003). Evaluation of the dual route theory of reading: a metaanalysis of 35 neuroimaging studies. *NeuroImage*, 20(2), 693-712.
- Jucla, M. (2009). *Aspects phonologiques, orthographiques et lexico-sémantiques du traitement du langage : production orale versus écrite chez l'adulte et protocole d'intervention dans les dyslexies du développement - études comportementales et par la méthode des potentiels évoqués*. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse - Le Mirail.
- Kalafat, M., Hugonot-Diener, L., & Poitrenaud, J. (2003). Standardisation et étalonnage français du Mini Mental State (MMS) version GRÉCO. *Revue de neuropsychologie*, 13(2), 209-236.
- Kandel, S., Alvarez, C. J., & Vallée, N. (2006). Syllables as processing units in handwriting production. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 32(1), 18-31.
- Kandel, S., Héroult, L., Grosjacques, G., Lambert, E., & Fayol, M. (2009). Orthographic vs. phonologic syllables in handwriting production. *Cognition*, 110(3), 440-444.
- Kandel, S., Peereman, R., Grosjacques, G., & Fayol, M. (2011). For a psycholinguistic model of handwriting production: testing the syllable-bigram controversy. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 37(4), 1310-1322.
- Kandel, S., & Spinelli, E. (2010). Processing complex graphemes in handwriting production. *Memory & Cognition*, 38(6), 762-770. doi: 10.3758/MC.38.6.762
- Kandel, S., Spinelli, E., Tremblay, A., Guerassimovitch, H., & Alvarez, C. J. (2012). Processing prefixes and suffixes in handwriting production. *Acta Psychologica*, 140(3), 187-195. doi: DOI 10.1016/j.actpsy.2012.04.005
- Katanoda, K., Yoshikawa, K., & Sugishita, M. (2001). A functional MRI study on the neural substrates for writing. *Human Brain Mapping*, 13(1), 34-42.
- Kato, C., Isoda, H., Takehara, Y., Matsuo, K., Moriya, T., & Nakai, T. (1999). Involvement of motor cortices in retrieval of kanji studied by functional MRI. *Neuroreport*, 10(6), 1335-1339.
- Kello, C. T., Plaut, D. C., & MacWhinney, B. (2000). The task dependence of staged versus cascaded processing: an empirical and computational study of Stroop interference in speech production. *Journal of Experimental Psychology. General*, 129(3), 340-360.
- Knoch, D., Pascual-Leone, A., Meyer, K., Treyer, V., & Fehr, E. (2006). Diminishing reciprocal fairness by disrupting the right prefrontal cortex. *Science*, 314(5800), 829-832. doi: 10.1126/science.1129156
- Kobayashi, M., Hutchinson, S., Theoret, H., Schlaug, G., & Pascual-Leone, A. (2004). Repetitive TMS of the motor cortex improves ipsilateral sequential simple finger movements. *Neurology*, 62(1), 91-98.
- Kosslyn, S. M., Pascual-Leone, A., Felician, O., Camposano, S., Keenan, J. P., Thompson, W. L., . . . Alpert, N. M. (1999). The role of area 17 in visual imagery: convergent evidence from PET and rTMS. *Science*, 284(5411), 167-170.
- Kreiner, D. S. (1996). Effects of word familiarity and phoneme-grapheme polygraphy on oral spelling time and accuracy. *The Psychological Record*.
- Kuznetsova, A., Christensen, R., & Brockhoff, P. (2013). lmerTest: Tests for random and fixed effects for linear mixed effect models (lmer objects of lme4 package). *R package version 2.0-3*. Retrieved from <http://CRAN.R-project.org/package=lmerTest>
- Laird, A. R., Fox, P. M., Price, C. J., Glahn, D. C., Uecker, A. M., Lancaster, J. L., . . . Fox, P. T. (2005). ALE meta-analysis: controlling the false discovery rate and performing statistical contrasts. *Human Brain Mapping*, 25(1), 155-164.
- Lambert, E., Alamargot, D., Larocque, D., & Caporossi, G. (2011). Dynamics of the Spelling Process During a Copy Task: Effects of Regularity and Frequency. *Canadian Journal of Experimental Psychology-Revue Canadienne De Psychologie Experimentale*, 65(3), 141-150. doi: Doi 10.1037/A0022538

- Lambert, E., Kandel, S., Fayol, M., & Esperet, E. (2008). The effect of the number of syllables on handwriting production. *Reading and Writing, 21*(9), 859-883. doi: DOI 10.1007/s11145-007-9095-5
- Lancaster, J. L., Tordesillas-Gutiérrez, D., Martínez, M., Salinas, F., Evans, A., Zilles, K., . . . Fox, P. T. (2007). Bias between MNI and Talairach coordinates analyzed using the ICBM-152 brain template. *Human Brain Mapping, 28*(11), 1194-1205.
- Lancaster, J. L., Woldorff, M. G., Parsons, L. M., Liotti, M., Freitas, C. S., Rainey, L., . . . Fox, P. T. (2000). Automated Talairach atlas labels for functional brain mapping. *Human Brain Mapping, 10*(3), 120-131.
- Lecours, A. R. (1996). *Langage écrit: histoire, théorie et maladie*: Ortho Edition.
- Lefaucheur, J.-P., André-Obadia, N., Poulet, E., Devanne, H., Haffen, E., Londero, A., . . . Saba, G. (2011). Recommandations françaises sur l'utilisation de la stimulation magnétique transcrânienne répétitive (rTMS): règles de sécurité et indications thérapeutiques. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology, 41*(5), 221-295.
- Lefavrais, P. (1967). *Manuel du test de l'alouette: test d'analyse de la lecture et de la dyslexie*. Paris: Éditions du Centre de psychologie appliquée.
- Lenth, R. V. (2013). lsmeans: Least-squares means. *R package version 1.10-4*. Retrieved from <http://CRAN.R-project.org/package=lsmeans>
- Lesser, R. (1990). Superior Oral to Written Spelling - Evidence for Separate Buffers. *Cognitive Neuropsychology, 7*(4), 347-366. doi: Doi 10.1080/02643299008253448
- Lete, B., Peereman, R., & Fayol, M. (2008). Consistency and word-frequency effects on spelling among first- to fifth-grade French children: A regression-based study. *Journal of Memory and Language, 58*(4), 952-977. doi: DOI 10.1016/j.jml.2008.01.001
- Lete, B., Sprenger-Charolles, L., & Cole, P. (2004). MANULEX: a grade-level lexical database from French elementary school readers. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers, 36*(1), 156-166.
- Levelt, W. J., Roelofs, A., & Meyer, A. S. (1999). A theory of lexical access in speech production. *The Behavioral and Brain Sciences, 22*(1), 1-38; discussion 38-75-31-38; discussion 38-75.
- Levelt, W. J. M., Schriefers, H., Vorberg, D., Meyer, A. S., Pechmann, T., & Havinga, J. (1991). The Time Course of Lexical Access in Speech Production - a Study of Picture Naming. *Psychological Review, 98*(1), 122-142. doi: Doi 10.1037//0033-295x.98.1.122
- Lichtheim, L. (1885). On aphasia. *Brain, 7*, 433-484.
- Logan, G. D. (1980). Attention and automaticity in Stroop and priming tasks: Theory and data. *Cognitive Psychology, 12*(4), 523-553.
- Longcamp, M., Anton, J.-L., Roth, M., & Velay, J.-L. (2003). Visual presentation of single letters activates a premotor area involved in writing. *NeuroImage, 19*(4), 1492-1500.
- Longcamp, M., Anton, J. L., Roth, M., & Velay, J. L. (2005). Premotor activations in response to visually presented single letters depend on the hand used to write: a study on left-handers. *Neuropsychologia, 43*(12), 1801-1809. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2005.01.020
- Longcamp, M., Hlushchuk, Y., & Hari, R. (2011). What differs in visual recognition of handwritten vs. printed letters? An fMRI study. *Human Brain Mapping, 32*(8), 1250-1259. doi: 10.1002/hbm.21105
- Longcamp, M., Tanskanen, T., & Hari, R. (2006). The imprint of action: motor cortex involvement in visual perception of handwritten letters. *NeuroImage, 33*(2), 681-688. doi: 10.1016/j.neuroimage.2006.06.042
- Loo, C. K., Taylor, J. L., Gandevia, S. C., McDermont, B. N., Mitchell, P. B., & Sachdev, P. S. (2000). Transcranial magnetic stimulation (TMS) in controlled treatment studies: are some "sham" forms active? *Biological psychiatry, 47*(4), 325-331.
- Lubrano, V., Roux, F. E., & Demonet, J. F. (2004). Writing-specific sites in frontal areas: a cortical stimulation study. *Journal of Neurosurgery, 101*(5), 787-798. doi: 10.3171/jns.2004.101.5.0787

- Luce, P. A., & Pisoni, D. B. (1998). Recognizing spoken words: The neighborhood activation model. *Ear and Hearing, 19*(1), 1-36. doi: Doi 10.1097/00003446-199802000-00001
- Luria, A. R. (1970). *Traumatic aphasia: Its syndromes, psychology and treatment* (Vol. 5): Walter De Gruyter.
- MacLeod, C. M. (1991). Half a century of research on the Stroop effect: an integrative review. *Psychological Bulletin, 109*(2), 163-203.
- Magrassi, L., Bongetta, D., Bianchini, S., Berardesca, M., & Arienta, C. (2010). Central and peripheral components of writing critically depend on a defined area of the dominant superior parietal gyrus. *Brain Research, 1346*, 145-154.
- Makuuchi, M., Kaminaga, T., & Sugishita, M. (2003). Both parietal lobes are involved in drawing: a functional MRI study Zn and implications for constructional apraxia. *Cognitive Brain Research, 16*(3), 338-347. doi: Doi 10.1016/S0926-6410(02)00302-6
- Margolin, D. I. (1984). The neuropsychology of writing and spelling: semantic, phonological, motor, and perceptual processes. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology. A, Human Experimental Psychology, 36*(3), 459-489.
- Marien, P., Verhoeven, J., Brouns, R., De Witte, L., Dobbeleir, A., & De Deyn, P. P. (2007). Apraxic agraphia following a right cerebellar hemorrhage. *Neurology, 69*(9), 926-929. doi: 10.1212/01.wnl.0000267845.05041.41
- Martin, K., Jacobs, S., & Frey, S. H. (2011). Handedness-dependent and -independent cerebral asymmetries in the anterior intraparietal sulcus and ventral premotor cortex during grasp planning. *NeuroImage, 57*(2), 502-512. doi: 10.1016/j.neuroimage.2011.04.036
- Matsuo, K., Kato, C., Ozawa, F., Takehara, Y., Isoda, H., Isogai, S., . . . Nakai, T. (2001). Ideographic characters call for extra processing to correspond with phonemes. *Neuroreport, 12*(10), 2227-2230.
- Matsuo, K., Kato, C., Sumiyoshi, C., Toma, K., Duy Thuy, D. H., Moriya, T., . . . Nakai, T. (2003). Discrimination of Exner's area and the frontal eye field in humans--functional magnetic resonance imaging during language and saccade tasks. *Neuroscience Letters, 340*(1), 13-16.
- McClelland, J. L., & Rumelhart, D. E. (1981). An interactive activation model of context effects in letter perception: I. An account of basic findings. *Psychological Review, 88*(5), 375.
- McCloskey, M., Badecker, W., Goodman-Schulman, R. A., & Aliminosa, D. (1994). The structure of graphemic representations in spelling: Evidence from a case of acquired dysgraphia. *Cognitive Neuropsychology, 11*(3), 341-392.
- Mechelli, A., Crinion, J. T., Long, S., Friston, K. J., Lambon Ralph, M. A., Patterson, K., . . . Price, C. J. (2005). Dissociating reading processes on the basis of neuronal interactions. *Journal of Cognitive Neuroscience, 17*(11), 1753-1765.
- Menon, V., & Desmond, J. E. (2001). Left superior parietal cortex involvement in writing: integrating fMRI with lesion evidence. *Brain Research. Cognitive Brain Research, 12*(2), 337-340.
- Mesulam, M. M. (1990). Large-scale neurocognitive networks and distributed processing for attention, language, and memory. *Annals of Neurology, 28*(5), 597-613.
- Meyer, A. S., Roelofs, A., & Levelt, W. J. M. (2003). Word length effects in object naming: The role of a response criterion. *Journal of Memory and Language, 48*(1), 131-147.
- Miceli, G., Benvegna, B., Capasso, R., & Caramazza, A. (1997). The independence of phonological and orthographic lexical forms: Evidence from aphasia. *Cognitive Neuropsychology, 14*(1), 35-69.
- Miceli, G., Benvegna, B., Capasso, R., & Caramazza, A. (1995). Selective deficit in processing double letters. *Cortex, 31*(1), 161-171.
- Miceli, G., Capasso, R., & Caramazza, A. (1994). The interaction of lexical and sublexical processes in reading, writing and repetition. *Neuropsychologia, 32*(3), 317-333.
- Miceli, G., Capasso, R., & Caramazza, A. (1999). Sublexical conversion procedures and the interaction of phonological and orthographic lexical forms. *Cognitive Neuropsychology, 16*(6), 557-572.

- Miceli, G., & Silveri, M. C. (1985). Cognitive Analysis of a Case of Pure Dysgraphia. *Brain and Language*, 25(2), 187-212. doi: Doi 10.1016/0093-934x(85)90080-X
- Middleton, F. A., & Strick, P. L. (2000). Basal ganglia and cerebellar loops: motor and cognitive circuits. *Brain Research. Brain Research Reviews*, 31(2-3), 236-250.
- Morrison, C. M., Chappell, T. D., & Ellis, A. W. (1997). Age of acquisition norms for a large set of object names and their relation to adult estimates and other variables. *Quarterly Journal of Experimental Psychology Section a-Human Experimental Psychology*, 50(3), 528-559.
- Morrison, C. M., Ellis, A. W., & Quinlan, P. T. (1992). Age of acquisition, not word frequency, affects object naming, not object recognition. *Memory & Cognition*, 20(6), 705-714.
- Morsella, E., & Miozzo, M. (2002). Evidence for a cascade model of lexical access in speech production. *Journal of Experimental Psychology. Learning, Memory, and Cognition*, 28(3), 555-563.
- Morton, J., & Patterson, K. (1980). A new attempt at an interpretation, or, an attempt at a new interpretation. *Deep dyslexia*, 91-118.
- Mottaghy, F. M., Gangitano, M., Sparing, R., Krause, B. J., & Pascual-Leone, A. (2002). Segregation of areas related to visual working memory in the prefrontal cortex revealed by rTMS. *Cerebral Cortex*, 12(4), 369-375.
- Murdoch, B. E. (2010). The cerebellum and language: historical perspective and review. *Cortex*, 46(7), 858-868.
- Naeser, M. A., Martin, P. I., Nicholas, M., Baker, E. H., Seekins, H., Helm-Estabrooks, N., . . . Pascual-Leone, A. (2005). Improved naming after TMS treatments in a chronic, global aphasia patient--case report. *Neurocase*, 11(3), 182-193.
- Naeser, M. A., Martin, P. I., Treglia, E., Ho, M., Kaplan, E., Bashir, S., . . . Pascual-Leone, A. (2010). Research with rTMS in the treatment of aphasia. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 28(4), 511-529.
- Nakamura, K., Honda, M., Hirano, S., Oga, T., Sawamoto, N., Hanakawa, T., . . . Shibasaki, H. (2002). Modulation of the visual word retrieval system in writing: a functional MRI study on the Japanese orthographies. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(1), 104-115.
- Nakamura, K., Honda, M., Okada, T., Hanakawa, T., Toma, K., Fukuyama, H., . . . Shibasaki, H. (2000). Participation of the left posterior inferior temporal cortex in writing and mental recall of kanji orthography: A functional MRI study. *Brain*, 123 (Pt 5), 954-967.
- Neils, J., Roeltgen, D. P., & Constantinidou, F. (1995). Decline in homophone spelling associated with loss of semantic influence on spelling in Alzheimer's disease. *Brain and Language*, 49(1), 27-49. doi: 10.1006/brln.1995.1020
- New, B. (2006). *Lexique 3: une nouvelle base de données lexicales*. Paper presented at the Verbum ex machina. Actes de la 13e conférence sur le Traitement automatique des langues naturelles, Cahiers du Cental.
- New, B., Pallier, C., Brysbaert, M., & Ferrand, L. (2004). Lexique 2: a new French lexical database. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 36(3), 516-524.
- 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.
- Nicolson, R. I., & Fawcett, A. J. (2011). Dyslexia, dysgraphia, procedural learning and the cerebellum. *Cortex*, 47(1), 117-127. doi: 10.1016/j.cortex.2009.08.016
- Nicolson, R. I., Fawcett, A. J., & Dean, P. (2001). Developmental dyslexia: the cerebellar deficit hypothesis. *Trends in Neurosciences*, 24(9), 508-511.
- Nielsen, J. (1948). *Agnosia, Apraxia, Aphasia. Their Value in Cerebral Localization*. New York: Hoeber.
- Nixon, P., Lazarova, J., Hodinott-Hill, I., Gough, P., & Passingham, R. (2004). The inferior frontal gyrus and phonological processing: an investigation using rTMS. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16(2), 289-300.
- Nobre, A. C., Allison, T., & McCarthy, G. (1994). Word recognition in the human inferior temporal lobe. *Nature*, 372(6503), 260-263.

- Nobre, A. C., Sebestyen, G. N., Gitelman, D. R., Mesulam, M. M., Frackowiak, R. S. J., & Frith, C. D. (1997). Functional localization of the system for visuospatial attention using positron emission tomography. *Brain*, *120*, 515-533. doi: DOI 10.1093/brain/120.3.515
- O'Shea, J., & Walsh, V. (2007). Transcranial magnetic stimulation. *Current Biology*, *17*(6), R196-R199.
- Ogle, W. (1867). *Aphasia and agraphia*.
- Ohyama, T., Nores, W. L., Murphy, M., & Mauk, M. D. (2003). What the cerebellum computes. *Trends in Neurosciences*, *26*(4), 222-227.
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, *9*(1), 97-113.
- Oldfield, R. C., & Wingfield, A. (1965). Response latencies in naming objects. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *17*(4), 273-281.
- Olson, A., & Caramazza, A. (1994). Representation and connectionist models: The NETspell experience. *Handbook of spelling: Theory, process and intervention*, 337-363.
- Omura, K., Tsukamoto, T., Kotani, Y., Ohgami, Y., & Yoshikawa, K. (2004). Neural correlates of phoneme-to-grapheme conversion. *Neuroreport*, *15*(6), 949-953.
- Otsuki, M., Soma, Y., Arai, T., Otsuka, A., & Tsuji, S. (1999). Pure apraxic agraphia with abnormal writing stroke sequences: report of a Japanese patient with a left superior parietal haemorrhage. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, *66*(2), 233-237.
- Pacton, S. (2008). L'apprentissage de l'orthographe lexicale du français. *Orthographe française: évolution et pratique*, *28*, 47-68.
- Pacton, S., Fayol, M., & Lété, B. (2008). L'intégration des connaissances lexicales et infralexicales dans l'apprentissage du lexique orthographique. *ANAE*, *96*, 97, 213-219.
- Pacton, S., Fayol, M., & Perruchet, P. (2005). Children's implicit learning of graphotactic and morphological regularities. *Child Development*, *76*(2), 324-339.
- Pascual-Leone, A. (1999). Transcranial magnetic stimulation: studying the brain-behaviour relationship by induction of 'virtual lesions'. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, *354*(1387), 1229-1238.
- Pascual-Leone, A., Walsh, V., & Rothwell, J. (2000). Transcranial magnetic stimulation in cognitive neuroscience - virtual lesion, chronometry, and functional connectivity. *Current Opinion in Neurobiology*, *10*(2), 232-237.
- Patterson, K. (1986). Lexical but nonsemantic spelling? *Cognitive Neuropsychology*, *3*(3), 341-367.
- Patterson, K., & Wing, A. M. (1989). Processes in handwriting: A case for case. *Cognitive Neuropsychology*, *6*(1), 1-23.
- Paus, T. (1996). Location and function of the human frontal eye-field: a selective review. *Neuropsychologia*, *34*(6), 475-483.
- Peereman, R. (1997). Orthographic and phonological neighborhoods in naming: Not all neighbors are equally influential in orthographic space. *Journal of Memory and Language*, *37*(3), 382-410.
- Peereman, R., & Content, A. (1999). LEXOP: a lexical database providing orthography-phonology statistics for French monosyllabic words. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, *31*(2), 376-379.
- Peereman, R., Lete, B., & Sprenger-Charolles, L. (2007). Manulex-infra: distributional characteristics of grapheme-phoneme mappings, and infralexical and lexical units in child-directed written material. *Behavior Research Methods*, *39*(3), 579-589.
- Penfield, W., & Roberts, L. (1959). Speech and brain mechanisms.
- Pernet, C. R., Poline, J. B., Demonet, J. F., & Rousselet, G. A. (2009). Brain classification reveals the right cerebellum as the best biomarker of dyslexia. *BMC Neurosci*, *10*, 67. doi: 10.1186/1471-2202-10-67
- Perret, C., & Laganaro, M. (2012). Comparison of electrophysiological correlates of writing and speaking: a topographic ERP analysis. *Brain Topography*, *25*(1), 64-72. doi: 10.1007/s10548-011-0200-3

- Perry, C., & Ziegler, J. C. (2004). Beyond the two-strategy model of skilled spelling: effects of consistency, grain size, and orthographic redundancy. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology. A, Human Experimental Psychology*, *57*(2), 325-356.
- Petersen, S. E., Fox, P. T., Posner, M. I., Mintun, M., & Raichle, M. E. (1988). Positron emission tomographic studies of the cortical anatomy of single-word processing. *Nature*, *331*(6157), 585-589. doi: 10.1038/331585a0
- Petersen, S. E., Fox, P. T., Snyder, A. Z., & Raichle, M. E. (1990). Activation of extrastriate and frontal cortical areas by visual words and word-like stimuli. *Science*, *249*(4972), 1041-1044.
- Petrides, M., Alivisatos, B., & Evans, A. C. (1995). Functional activation of the human ventrolateral frontal cortex during mnemonic retrieval of verbal information. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *92*(13), 5803-5807.
- Petrides, M., & Pandya, D. N. (1984). Projections to the frontal cortex from the posterior parietal region in the rhesus monkey. *Journal of Comparative Neurology*, *228*(1), 105-116.
- Picard, N., & Strick, P. L. (1996). Motor areas of the medial wall: a review of their location and functional activation. *Cerebral Cortex*, *6*(3), 342-353.
- Plamondon, R., & Djioa, M. (2006). A multi-level representation paradigm for handwriting stroke generation. *Human Movement Science*, *25*(4-5), 586-607. doi: DOI 10.1016/j.humov.2006.07.004
- Planton, S., & Démonet, J.-F. (2012). Neurophysiologie du langage : apports de la neuro-imagerie et état des connaissances. *Revue de neuropsychologie*, *4*(4), 255. doi: 10.3917/rne.044.0255
- Planton, S., Jucla, M., Roux, F. E., & Demonet, J. F. (2013). The "handwriting brain": A meta-analysis of neuroimaging studies of motor versus orthographic processes. *Cortex*, *49*(10), 2772-2787. doi: 10.1016/j.cortex.2013.05.011
- Plaut, D. C., McClelland, J. L., Seidenberg, M. S., & Patterson, K. (1996). Understanding normal and impaired word reading: computational principles in quasi-regular domains. *Psychological Review*, *103*(1), 56.
- Posteraro, L., Zinelli, P., & Mazzucchi, A. (1988). Selective Impairment of the Graphemic Buffer in Acquired Dysgraphia - a Case-Study. *Brain and Language*, *35*(2), 274-286. doi: Doi 10.1016/0093-934x(88)90112-5
- Price, C. J. (2010). The anatomy of language: a review of 100 fMRI studies published in 2009. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1191*, 62-88.
- Price, C. J. (2012). A review and synthesis of the first 20 years of PET and fMRI studies of heard speech, spoken language and reading. *NeuroImage*, *62*(2), 816-847. doi: 10.1016/j.neuroimage.2012.04.062
- Price, C. J., & Devlin, J. T. (2003). The myth of the visual word form area. *NeuroImage*, *19*(3), 473-481.
- Price, C. J., Mummery, C. J., Moore, C. J., Frakowiak, R. S., & Friston, K. J. (1999). Delineating necessary and sufficient neural systems with functional imaging studies of neuropsychological patients. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *11*(4), 371-382.
- Purcell, J. J., Napoliello, E. M., & Eden, G. F. (2011a). A combined fMRI study of typed spelling and reading. *NeuroImage*, *55*(2), 750-762.
- Purcell, J. J., Turkeltaub, P. E., Eden, G. F., & Rapp, B. (2011b). Examining the central and peripheral processes of written word production through meta-analysis. *Frontiers in Psychology*, *2*, 239-239.
- Rademacher, J., Burgel, U., Geyer, S., Schormann, T., Schleicher, A., Freund, H. J., & Zilles, K. (2001). Variability and asymmetry in the human precentral motor system. A cytoarchitectonic and myeloarchitectonic brain mapping study. *Brain*, *124*(Pt 11), 2232-2258.
- Raichle, M. E., MacLeod, A. M., Snyder, A. Z., Powers, W. J., Gusnard, D. A., & Shulman, G. L. (2001). A default mode of brain function. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *98*(2), 676-682.

- Randhawa, B. K., Farley, B. G., & Boyd, L. A. (2013). Repetitive transcranial magnetic stimulation improves handwriting in Parkinson's disease. *Parkinsons Dis*, 2013, 751925. doi: 10.1155/2013/751925
- Rapcsak, S. Z., Arthur, S. A., & Rubens, A. B. (1988). Lexical agraphia from focal lesion of the left precentral gyrus. *Neurology*, 38(7), 1119-1123.
- Rapcsak, S. Z., & Beeson, P. M. (2004). The role of left posterior inferior temporal cortex in spelling. *Neurology*, 62(12), 2221-2229.
- Rapcsak, S. Z., Beeson, P. M., Henry, M. L., Leyden, A., Kim, E., Rising, K., . . . Cho, H. (2009). Phonological dyslexia and dysgraphia: cognitive mechanisms and neural substrates. *Cortex*, 45(5), 575-591.
- Rapcsak, S. Z., Henry, M. L., Teague, S. L., Carnahan, S. D., & Beeson, P. M. (2007). Do dual-route models accurately predict reading and spelling performance in individuals with acquired alexia and agraphia? *Neuropsychologia*, 45(11), 2519-2524.
- Rapcsak, S. Z., & Rubens, A. B. (1990). Disruption of semantic influence on writing following a left prefrontal lesion. *Brain and Language*, 38(2), 334-344.
- Rapp, B., Benzing, L., & Caramazza, A. (1997). The autonomy of lexical orthography. *Cognitive Neuropsychology*, 14(1), 71-104.
- Rapp, B., & Dufor, O. (2011). The neurotopography of written word production: an fMRI investigation of the distribution of sensitivity to length and frequency. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(12), 4067-4081.
- Rapp, B., Epstein, C., & Tainturier, M.-J. (2002). The integration of information across lexical and sublexical processes in spelling. *Cognitive Neuropsychology*, 19(1), 1-29.
- Rapp, B., & Lipka, K. (2011). The literate brain: the relationship between spelling and reading. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(5), 1180-1197.
- Ratcliff, R. (1993). Methods for dealing with reaction time outliers. *Psychological Bulletin*, 114(3), 510-532.
- Roeltgen, D. P. (2003). Agraphia. In K. M. Heilman & E. Valenstein (Eds.), *Clinical Neuropsychology* (pp. 126-145). Oxford: Oxford University Press.
- Roeltgen, D. P., Gonzalez Rothi, L., & Heilman, K. M. (1986). Linguistic semantic agraphia: a dissociation of the lexical spelling system from semantics. *Brain and Language*, 27(2), 257-280.
- Roeltgen, D. P., & Heilman, K. M. (1983). Apractic agraphia in a patient with normal praxis. *Brain and Language*, 18(1), 35-46.
- Roeltgen, D. P., & Heilman, K. M. (1984). Lexical agraphia. Further support for the two-system hypothesis of linguistic agraphia. *Brain*, 107 (Pt 3), 811-827.
- Roeltgen, D. P., Sevush, S., & Heilman, K. M. (1983). Phonological agraphia: writing by the lexical-semantic route. *Neurology*, 33(6), 755-765.
- Rorden, C., & Brett, M. (2000). Stereotaxic display of brain lesions. *Behavioural Neurology*, 12(4), 191-200.
- Roux, F.-E., Dufor, O., Giussani, C., Wamain, Y., Draper, L., Longcamp, M., & Démonet, J.-F. (2009). The graphemic/motor frontal area Exner's area revisited. *Annals of Neurology*, 66(4), 537-545.
- Roux, F. E., Boetto, S., Sacko, O., Chollet, F., & Tremoulet, M. (2003). Writing, calculating, and finger recognition in the region of the angular gyrus: a cortical stimulation study of Gerstmann syndrome. *Journal of Neurosurgery*, 99(4), 716-727. doi: 10.3171/jns.2003.99.4.0716
- Roux, F. E., Draper, L., Kopke, B., & Demonet, J. F. (2010). Who actually read Exner? Returning to the source of the frontal "writing centre" hypothesis. *Cortex*, 46(9), 1204-1210. doi: 10.1016/j.cortex.2010.03.001
- Roux, F. E., Durand, J. B., Jucla, M., Rehault, E., Reddy, M., & Demonet, J. F. (2012). Segregation of lexical and sub-lexical reading processes in the left perisylvian cortex. *PLoS One*, 7(11), e50665. doi: 10.1371/journal.pone.0050665

- Roux, F. E., Durand, J. B., Rehault, E., Planton, S., Draper, L., & Demonet, J. F. (2014). The neural basis for writing from dictation in the temporoparietal cortex. *Cortex*, *50*, 64-75. doi: 10.1016/j.cortex.2013.09.012
- Roux, S., & Bonin, P. (2009). Neighborhood effects in spelling in adults. *Psychonomic Bulletin & Review*, *16*(2), 369-373.
- Roux, S., & Bonin, P. (2011). Comment l'information circule d'un niveau de traitement à l'autre lors de l'accès lexical en production verbale de mots? *Éléments de synthèse. Année psychologique*, *111*(1), 145.
- Roux, S., & Bonin, P. (2012). Cascaded processing in written naming: Evidence from the picture-picture interference paradigm. *Language and Cognitive Processes*, *27*(5), 734-769. doi: Doi 10.1080/01690965.2011.580162
- Roux, S., McKeeff, T. J., Grosjacques, G., Afonso, O., & Kandel, S. (2013). The interaction between central and peripheral processes in handwriting production. *Cognition*, *127*(2), 235-241. doi: DOI 10.1016/j.cognition.2012.12.009
- Sack, A. T., Cohen Kadosh, R., Schuhmann, T., Moerel, M., Walsh, V., & Goebel, R. (2009). Optimizing functional accuracy of TMS in cognitive studies: a comparison of methods. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *21*(2), 207-221. doi: 10.1162/jocn.2009.21126
- Sage, K., & Ellis, A. W. (2004). Lexical influences in graphemic buffer disorder. *Cognitive Neuropsychology*, *21*(2-4), 381-400.
- Sakurai, Y., Onuma, Y., Nakazawa, G., Ugawa, Y., Momose, T., Tsuji, S., & Mannen, T. (2007). Parietal dysgraphia: characterization of abnormal writing stroke sequences, character formation and character recall. *Behavioural Neurology*, *18*(2), 99-114.
- Sandrini, M., Umiltà, C., & Rusconi, E. (2011). The use of transcranial magnetic stimulation in cognitive neuroscience: A new synthesis of methodological issues. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *35*(3), 516-536. doi: DOI 10.1016/j.neubiorev.2010.06.005
- Saur, D., Schelter, B., Schnell, S., Kratochvil, D., Küpper, H., Kellmeyer, P., . . . Weiller, C. (2010). Combining functional and anatomical connectivity reveals brain networks for auditory language comprehension. *NeuroImage*, *49*(4), 3187-3197.
- Scarone, P., Gatignol, P., Guillaume, S., Denvil, D., Capelle, L., & Duffau, H. (2009). Agraphia after awake surgery for brain tumor: new insights into the anatomo-functional network of writing. *Surgical Neurology*, *72*(3), 223-241. doi: 10.1016/j.surneu.2008.10.074
- Segal, E., & Petrides, M. (2012). The anterior superior parietal lobule and its interactions with language and motor areas during writing. *The European Journal of Neuroscience*, *35*(2), 309-322. doi: 10.1111/j.1460-9568.2011.07937.x
- Seidenberg, M. S., & McClelland, J. L. (1989). A distributed, developmental model of word recognition and naming. *Psychological Review*, *96*(4), 523.
- Seitz, R. J., Canavan, A. G., Yáguez, L., Herzog, H., Tellmann, L., Knorr, U., . . . Hömberg, V. (1997). Representations of graphomotor trajectories in the human parietal cortex: evidence for controlled processing and automatic performance. *The European Journal of Neuroscience*, *9*(2), 378-389.
- Shallice, T. (1981). Phonological agraphia and the lexical route in writing. *Brain*, *104*(3), 413-429.
- Siebner, H. R., Hartwigsen, G., Kassuba, T., & Rothwell, J. C. (2009). How does transcranial magnetic stimulation modify neuronal activity in the brain? Implications for studies of cognition. *Cortex*, *45*(9), 1035-1042. doi: DOI 10.1016/j.cortex.2009.02.007
- Snodgrass, J. G., & Vanderwart, M. (1980). A standardized set of 260 pictures: norms for name agreement, image agreement, familiarity, and visual complexity. *Journal of Experimental Psychology. Human Learning and Memory*, *6*(2), 174.
- Soma, Y., Sugishita, M., Kitamura, K., Maruyama, S., & Imanaga, H. (1989). Lexical agraphia in the Japanese language. Pure agraphia for Kanji due to left posteroinferior temporal lesions. *Brain*, *112* (Pt 6), 1549-1561.
- Soum, C. (1997). *L'apprentissage de l'écriture; Contraintes orthographiques & contraintes phonologiques*. Thèse de Doctorat, Toulouse.

- Soum, C., & Nespoulous, J.-L. (1999). La complexité de l'orthographe est-elle seule responsable des erreurs orthographiques chez l'enfant ? *Rééducation orthophonique*, 37, 115-127.
- Sparing, R., Buelte, D., Meister, I. G., Paus, T., & Fink, G. R. (2008). Transcranial magnetic stimulation and the challenge of coil placement: a comparison of conventional and stereotaxic neuronavigational strategies. *Human Brain Mapping*, 29(1), 82-96. doi: 10.1002/hbm.20360
- Stambak, M. (1960). Une épreuve de pointillage. Zazzo, R.: *Manuel pour l'examen psychologique de l'enfant. Delachaux et Niestlé, Neuchâtel.*
- Stoodley, C. J., & Schmahmann, J. D. (2009). Functional topography in the human cerebellum: a meta-analysis of neuroimaging studies. *NeuroImage*, 44(2), 489-501.
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18(6), 643-662.
- Suchan, B., Yágüez, L., Wunderlich, G., Canavan, A. G., Herzog, H., Tellmann, L., . . . Seitz, R. J. (2002). Neural correlates of visuospatial imagery. *Behavioural Brain Research*, 131(1), 163-168.
- Sugihara, G., Kaminaga, T., & Sugishita, M. (2006). Interindividual uniformity and variety of the "Writing center": a functional MRI study. *NeuroImage*, 32(4), 1837-1849.
- Tainturier, M.-J., & Caramazza, A. (1996). The status of double letters in graphemic representations. *Journal of Memory and Language*, 35(1), 53-73.
- Tainturier, M.-J., & Rapp, B. (2001). The spelling process. *The handbook of cognitive neuropsychology*, 233-262.
- Talairach, J., & Tournoux, P. (1988). *Co-planar stereotaxic atlas of the human brain: 3-dimensional proportional system : an approach to cerebral imaging.* Stuttgart-New York: Thieme.
- Tan, L. H., Laird, A. R., Li, K., & Fox, P. T. (2005). Neuroanatomical correlates of phonological processing of Chinese characters and alphabetic words: A meta-analysis. *Human Brain Mapping*, 25(1), 83-91. doi: Doi 10.1002/Hbm.20134
- Terao, Y., Furubayashi, T., Okabe, S., Mochizuki, H., Arai, N., Kobayashi, S., & Ugawa, Y. (2007). Modifying the cortical processing for motor preparation by repetitive transcranial magnetic stimulation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19(9), 1556-1573. doi: 10.1162/jocn.2007.19.9.1556
- Teulings, H. L., & Schomaker, L. R. B. (1993). Invariant Properties between Stroke Features in Handwriting. *Acta Psychologica*, 82(1-3), 69-88. doi: Doi 10.1016/0001-6918(93)90005-C
- Thomassen, A., & Van Galen, G. P. (1992). Handwriting as a motor task: Experimentation, modelling, and simulation. *Approaches to the study of motor control and learning*, 113-144.
- Thut, G., Nietzel, A., & Pascual-Leone, A. (2005). Dorsal posterior parietal rTMS affects voluntary orienting of visuospatial attention. *Cerebral Cortex*, 15(5), 628-638. doi: 10.1093/cercor/bhh164
- Tokunaga, H., Nishikawa, T., Ikejiri, Y., Nakagawa, Y., Yasuno, F., Hashikawa, K., . . . Takeda, M. (1999). Different neural substrates for Kanji and Kana writing: a PET study. *Neuroreport*, 10(16), 3315-3319.
- Treiman, R., & Kessler, B. (2006). Spelling as statistical learning: Using consonantal context to spell vowels. *Journal of Educational Psychology*, 98(3), 642-652. doi: Doi 10.1037/0022-0663.98.3.642
- Tunik, E., Ortigue, S., Adamovich, S. V., & Grafton, S. T. (2008). Differential recruitment of anterior intraparietal sulcus and superior parietal lobule during visually guided grasping revealed by electrical neuroimaging. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 28(50), 13615-13620. doi: 10.1523/JNEUROSCI.3303-08.2008
- Turkeltaub, P. E., Eden, G. F., Jones, K. M., & Zeffiro, T. A. (2002). Meta-Analysis of the Functional Neuroanatomy of Single-Word Reading: Method and Validation. *NeuroImage*, 16(3, Part 1), 765-780.

- Turkeltaub, P. E., Eickhoff, S. B., Laird, A. R., Fox, M., Wiener, M., & Fox, P. (2012). Minimizing within-experiment and within-group effects in Activation Likelihood Estimation meta-analyses. *Human Brain Mapping, 33*(1), 1-13. doi: 10.1002/hbm.21186
- Ueki, Y., Mima, T., Nakamura, K., Oga, T., Shibasaki, H., Nagamine, T., & Fukuyama, H. (2006). Transient functional suppression and facilitation of Japanese ideogram writing induced by repetitive transcranial magnetic stimulation of posterior inferior temporal cortex. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience, 26*(33), 8523-8530. doi: 10.1523/JNEUROSCI.0846-06.2006
- Uylings, H. B. M., Rajkowska, G., Sanz-Arigitia, E., Amunts, K., & Zilles, K. (2005). Consequences of large interindividual variability for human brain atlases: converging macroscopical imaging and microscopical neuroanatomy. *Anatomy and Embryology, 210*(5-6), 423-431. doi: DOI 10.1007/s00429-005-0042-4
- Vallée, N., & Rousset, I. (2004). *Indices en typologie des structures lexicales et syllabiques pour la discrimination et l'identification des langues*. Paper presented at the Identification des langues et des variétés dialectales par les humains et par les machines, Paris.
- van Drempt, N., McCluskey, A., & Lannin, N. A. (2011). A review of factors that influence adult handwriting performance. *Australian occupational therapy journal, 58*(5), 321-328.
- Van Galen, G. P. (1991). Handwriting: Issues for a psychomotor theory. *Human Movement Science, 10*(2-3), 165-191.
- Van Galen, G. P., Smyth, M. M., Meulenbroek, R., & Hylkema, H. (1989). The role of short-term memory and the motor buffer in handwriting under visual and non-visual guidance. *Computer recognition and human production of handwriting, 253-271*.
- Van Gemmert, A. W., Teulings, H. L., & Stelmach, G. E. (2001). Parkinsonian patients reduce their stroke size with increased processing demands. *Brain and Cognition, 47*(3), 504-512.
- Vanderhasselt, M.-A., De Raedt, R., Baeken, C., Leyman, L., & D'haenen, H. (2006). The influence of rTMS over the left dorsolateral prefrontal cortex on Stroop task performance. *Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Expérimentation Cérébrale, 169*(2), 279-282.
- Varnava, A., Stokes, M. G., & Chambers, C. D. (2011). Reliability of the 'observation of movement' method for determining motor threshold using transcranial magnetic stimulation. *Journal of Neuroscience Methods, 201*(2), 327-332. doi: 10.1016/j.jneumeth.2011.08.016
- Vidal, J. R., Freyermuth, S., Jerbi, K., Hamame, C. M., Ossandon, T., Bertrand, O., . . . Lachaux, J. P. (2012). Long-distance amplitude correlations in the high gamma band reveal segregation and integration within the reading network. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience, 32*(19), 6421-6434. doi: 10.1523/JNEUROSCI.4363-11.2012
- Vigneau, M., Beaucousin, V., Hervé, P. Y., Duffau, H., Crivello, F., Houdé, O., . . . Tzourio-Mazoyer, N. (2006). Meta-analyzing left hemisphere language areas: phonology, semantics, and sentence processing. *NeuroImage, 30*(4), 1414-1432.
- Vigneau, M., Beaucousin, V., Herve, P. Y., Jobard, G., Petit, L., Crivello, F., . . . Tzourio-Mazoyer, N. (2011). What is right-hemisphere contribution to phonological, lexico-semantic, and sentence processing? Insights from a meta-analysis. *NeuroImage, 54*(1), 577-593. doi: 10.1016/j.neuroimage.2010.07.036
- Vogel, A. C., Petersen, S. E., & Schlaggar, B. L. (2012). The left occipitotemporal cortex does not show preferential activity for words. *Cerebral Cortex, 22*(12), 2715-2732. doi: 10.1093/cercor/bhr295
- Wagner, T., Rushmore, J., Eden, U., & Valero-Cabre, A. (2009). Biophysical foundations underlying TMS: setting the stage for an effective use of neurostimulation in the cognitive neurosciences. *Cortex, 45*(9), 1025-1034. doi: 10.1016/j.cortex.2008.10.002
- Wamain, Y., Tallet, J., Zanone, P. G., & Longcamp, M. (2012). Brain responses to handwritten and printed letters differentially depend on the activation state of the primary motor cortex. *NeuroImage, 63*(3), 1766-1773. doi: 10.1016/j.neuroimage.2012.07.020
- Wandell, B. A. (2011). The neurobiological basis of seeing words. *Annals of the New York Academy of Sciences, 1224*, 63-80. doi: 10.1111/j.1749-6632.2010.05954.x

- Wann, J., & Nimmo-Smith, I. (1991). The control of pen pressure in handwriting: A subtle point. *Human Movement Science, 10*(2), 223-246.
- Wassermann, E. M. (1998). Risk and safety of repetitive transcranial magnetic stimulation: report and suggested guidelines from the International Workshop on the Safety of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation, June 5-7, 1996. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 108*(1), 1-16.
- Watson, R. T., Fleet, W. S., Gonzalez-Rothi, L., & Heilman, K. M. (1986). Apraxia and the supplementary motor area. *Archives of Neurology, 43*(8), 787-792.
- Wernicke, C. (1874). *Der aphasische Symptomencomplex*. Breslau, Poland: Cohen and Weigert.
- Wing, A. M., & Baddeley, A. D. (1980). Spelling errors in handwriting: A corpus and a distributional analysis. *Cognitive processes in spelling, 251-285*.
- Yantis, S., Schwarzbach, J., Serences, J. T., Carlson, R. L., Steinmetz, M. A., Pekar, J. J., & Courtney, S. M. (2002). Transient neural activity in human parietal cortex during spatial attention shifts. *Nature Neuroscience, 5*(10), 995-1002. doi: 10.1038/nn921
- Yates, M. (2005). Phonological neighbors speed visual word processing: evidence from multiple tasks. *Journal of Experimental Psychology. Learning, Memory, and Cognition, 31*(6), 1385.
- Zesiger, P., Pegna, A., & Rilliet, B. (1994). Unilateral Dysgraphia of the Dominant Hand in a Left-Hander - a Disruption of Graphic Motor Pattern Selection. *Cortex, 30*(4), 673-683.
- Zevin, J. D., & Seidenberg, M. S. (2002). Age of acquisition effects in word reading and other tasks. *Journal of Memory and Language, 47*(1), 1-29.
- Zhang, Q., & Damian, M. F. (2010). Impact of phonology on the generation of handwritten responses: Evidence from picture-word interference tasks. *Memory & Cognition, 38*(8), 1162-1162. doi: Doi 10.3758/Mc.38.8.1162
- Ziegler, J. C., Jacobs, A. M., & Stone, G. O. (1996). Statistical analysis of the bidirectional inconsistency of spelling and sound in French. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers, 28*(4), 504-515.
- Ziegler, J. C., & Muneaux, M. (2007). Orthographic facilitation and phonological inhibition in spoken word recognition: A developmental study. *Psychonomic Bulletin & Review, 14*(1), 75-80.

Table des figures

Figure I-1 : Modèle de production orthographique sous dictée à double voie de Rapp et al. (2002).....	21
Figure I-2 : Modèle de production orthographique sous dictée de Caramazza et al. (1987).....	23
Figure I-3 : Modèle de Ellis (1988)	25
Figure I-4 : Intégration de l'information lexicale et sous-lexicale dans le modèle de Rapp et al. (2002)	26
Figure I-5 : Modèle de la production de l'écriture manuscrite de Van Galen (1991).	29
Figure I-6 : Modèle de la lecture double voie à traitement en cascade de (Coltheart et al., 2001).	31
Figure I-7 : Modèle « en triangle » de Seidenberg et McClelland (1989), implémenté par (Harm & Seidenberg, 2001, 2004) pour examiner les liens entre codes phonologiques et codes orthographiques.....	33
Figure II-1 : Localisation anatomiques des principales régions corticales de l'hémisphère gauche impliquées dans les fonctions du langage (Planton & Démonet, 2012).....	51
Figure II-2 : Dissociation entre effet de lexicalité chez les patients avec lésion périsylvienne et effet de régularité chez les patients avec lésion temporale extra-sylvienne. D'après (Henry et al., 2007).	56
Figure II-3 : Exemple de deux cas d'agraphie apraxique « pure » consécutives à une lésion frontale prémotrice gauche (à gauche ; Anderson et al., 1990) et pariétale supérieure gauche (à droite ; Auerbach & Alexander, 1981).	57
Figure II-4 : Un modèle neuropsychologique de l'écriture (selon Roeltgen, 2003)	59
Figure II-5 : Cartes d'activations rapportées par Katanoda et al. (2001) comparant une tâche de dénomination écrite en IRMf à une tâche de dénomination et à une tâche de <i>finger tapping</i> , puis le résultat de la conjonction de ces deux contrastes.	61
Figure II-6 : Résultats de Roux et al. (2009) identifiant l'aire GMFA.....	64
Figure II-7 : Résultats rapportés par Roux et al. (2014) dans une expérimentation utilisation la stimulation corticale pour cartographier les fonctions d'écriture dans le cortex temporo-pariétal.....	69
Figure IV-1 : Augmentation du taux d'oxyhémoglobine lors de l'activité neuronale à la base du signal BOLD (d'après Huettel, Song, & McCarthy, 2004).....	86
Figure IV-2 : Protocoles de neuroimagerie « en blocs » et « événementiel ».	87
Figure IV-3 : Principe de l'induction électromagnétique à l'œuvre dans la TMS (adapté de Wagner, Rushmore, Eden, & Valero-Cabre, 2009).....	88
Figure IV-4 : Tracé quantile – quantile vérifiant la normalité des résidus du modèle avant et après la suppression des <i>outliers</i>	92
Figure V-1 : Schéma du dispositif utilisé.....	100
Figure V-2 Taux d'erreurs (%) en fonction des trois facteurs de régularité, position et longueur. Les barres d'erreur représentent l'erreur-type.	102
Figure V-3 : Interaction entre la régularité et la position sur les latences	104
Figure V-4 : Interaction entre la régularité et la position sur les vitesses moyennes d'écriture (moyennes ajustées du modèle).	105
Figure V-5 Taux d'erreurs (%) en fonction des trois facteurs de longueur, consistance initiale et consistance finale.....	120
Figure V-6 : Effets de consistance initiale et finale sur les latences.....	124
Figure V-7 : Illustration du traitement de la vitesse instantanée au cours du temps.....	126
Figure V-8 : Profil de la vitesse d'écriture en fonction du pourcentage de la durée selon la consistance initiale (indépendamment de la longueur des mots).	127

Figure V-9 : Profil de la vitesse d'écriture en fonction du pourcentage de la durée selon la consistance finale (indépendamment de la longueur des mots).....	128
Figure V-10 : Profil de la vitesse d'écriture en fonction du pourcentage de la durée selon la consistance finale sur les mots de 3 syllabes.	129
Figure VI-1 : Overview of the 462 foci used to conduct the main ALE analysis projected on a "glass brain" rendered template.....	147
Figure VI-2 : Schematic representation of the different cognitive processes involved in handwritten tasks used in neuroimaging.....	147
Figure VI-3 : Results of the ALE meta-analysis conducted with all the contrasts, projected on a standard rendered template.....	150
Figure VI-4 : Selected axial slices illustrating the differences between ALE secondary analyses performed with contrasts having controlled for verbal or linguistic input (red) and motor output (green)....	152
Figure VII-1 : Schéma des processus cognitifs impliqués dans les tâches de production écrite et de répétition orale utilisées dans l'expérimentation IRMf 1	168
Figure VII-2 : Déroulement temporel d'un run d'écriture sous dictée (extrait représentant 5 blocs consécutifs ; en haut) et détail du déroulement temporel de deux essais (en bas).	172
Figure VII-3 : Schéma récapitulatif des tâches et conditions utilisées dans le run d'écriture sous dictée (a) et le run de répétition orale (b).	172
Figure VII-4 : Tablette graphique amagnétique utilisée dans l'appareil d'IRM pour recueillir le tracé d'écriture.	174
Figure VII-5 : Histogramme cumulé des latences et durées d'écriture moyennes (en ms) lors de la tâche d'écriture selon le type de mot.....	178
Figure VII-6 : Projection des résultats d'IRMf rapportant les activations dans la tâche d'écriture sous dictée par rapport à la ligne de base ($p < .05$, FWE corr.).....	181
Figure VII-7 : Activations cérébrales pour le contraste « Ecriture sous dictée > Répétition orale »	182
Figure VII-8 : Activations cérébrales pour le contraste « Ecriture sous dictée > Traçage de créneaux » ...	183
Figure VII-9 : Estimation de la variation de signal BOLD selon le type de tâche dans 3 voxels	189
Figure VIII-1 : Schéma des processus cognitifs impliqués dans les tâches de dénomination écrite et d'épellation utilisées dans l'expérimentation IRMf 2.....	194
Figure VIII-2 : Relation linéaire entre l'âge d'acquisition des mots (score sur 5, en abscisse) et les latences d'écriture moyennes relevées dans la tâche de dénomination (en ordonnée).....	200
Figure VIII-3 : Relation linéaire entre la complexité de l'image (en abscisse) et les durées de production moyennes relevées dans la tâche de dessin (en ordonnée).	203
Figure VIII-4 : Schéma récapitulatif des tâches et conditions utilisées dans le run n°1 et le run n°2.....	207
Figure VIII-5 : Latences (a) et durées de productions (b) moyennes (ms) selon le type de tâche puis selon l'âge d'acquisition en dénomination écrite	212
Figure VIII-6 : Activations cérébrales pour le contraste « Dénomination écrite > Repos ».....	214
Figure VIII-7 : Activations cérébrales pour les contrastes « Dénomination écrite vs. Dessin ».....	215
Figure VIII-8 : a) Activations cérébrales pour la conjonction « Dénomination écrite << et << Epellation orale »	217
Figure VIII-9 : Estimation de la variation de signal BOLD selon le type de tâche dans la GMFA gauche et sa contrepartie droite (unités arbitraires).....	219
Figure IX-1 : Région d'intérêt utilisée pour localiser le pic d'activité correspondant à la GMFA	233
Figure IX-2 : Illustration chez un participant de la localisation fonctionnelle de la cible par superposition de la région d'intérêt (en vert) et du contraste d'imagerie « Ecriture vs. Répétition orale » ($p < 0.05$ FWE ; en rouge-jaune), permettant la localisation de la GMFA.....	234

Figure IX-3 : Région d'intérêt utilisée pour localiser le pic d'activité correspondant au CPS.....	235
Figure IX-4 : Sites de stimulation des 16 participants stimulés sur la GMFA (en rouge) et des 16 participants stimulés sur le CPS (en vert).....	236
Figure IX-5 : Capture d'écran du logiciel de neuronavigation permettant le guidage de la bobine TMS au-dessus de la cible avec précision.....	237
Figure IX-6 : Déroulement de l'expérimentation pour chaque sous-groupe.....	239
Figure IX-7 : a) Interaction entre la régularité et la longueur et b) interaction entre la régularité et la session sur les latences en production écrite sous dictée.....	246
Figure IX-8 : a) Interaction entre le type de tâche et la congruence et b) interaction entre le type de tâche et la session sur les latences en Stroop à l'écrit.....	251
Figure IX-9 : a) Interaction entre la régularité et la longueur et b) interaction entre la régularité et la session sur les latences en production écrite sous dictée.....	260
Figure IX-10 : a) Interaction entre la Tâche et la Congruence ($p < .0001$) et b) interaction (non significative) entre la Tâche et la Stimulation ($p = .053$) sur les latences en Stroop à l'écrit.....	264
Figure IX-11 : Illustration des effets de la stimulation rTMS sur les latences et sur la distance du tracé, en copie et en dénomination dans la tâche de Stroop à l'écrit.....	269
Figure IX-12 : Moyennes brutes (et erreur-types) des latences des mots courts et longs selon le type de stimulation dans les deux groupes de participants.....	274
Figure X-1 : Proposition d'un modèle de traitement en cascade des processus centraux et périphériques en écriture sous dictée.....	282
Figure XI-1 : Proposition d'un modèle de connectivité fonctionnelle entre les différentes aires impliquées dans les processus d'écriture.....	296

Table des tableaux

Table V-1 : Caractéristiques linguistiques des items utilisés dans la tâche d'écriture sous dictée de l'expérimentation préliminaire (n = 64) en fonction de leur longueur puis en fonction de leur régularité.....	98
Table V-2 : Nombre d'erreurs PPE localisées sur la séquence d'intérêt, en fonction des trois facteurs de régularité, position et longueur.	102
Table V-3 : Table de contingence du nombre d'erreurs PPE localisées sur la séquence d'intérêt en fonction des facteurs de régularité et de position.....	103
Table V-4 : Moyennes des latences (et écart-types), en fonction des trois facteurs de régularité, position et longueur (en ms).....	103
Table V-5 : Moyennes des vitesses d'écriture moyenne par mot (et écart-types), en fonction des trois facteurs de régularité, position et longueur (en cm/s).....	105
Table V-6 : Moyennes et percentiles de la valeur de consistance de l'initiale et de la finale sur l'ensemble de la base.....	115
Table V-7 : Caractéristiques linguistiques des items utilisés dans la tâche d'écriture sous dictée (n = 180) en fonction de leur longueur, puis de leur consistance initiale, puis de leur consistance finale.....	118
Table V-8 : Nombre d'erreurs PPE sur l'initiale, sur la finale et internes, selon la longueur du mot et la consistance initiale et finale.....	121
Table V-9 : Consistance moyenne, rang moyen et rang médian des couples phonèmes-graphèmes cible et produits par erreur, dans le cas d'erreurs sur l'initiale ou sur la finale.....	122
Table V-10 : Moyennes des latences (et écart-types), en fonction des facteurs de consistance initiale, finale et de longueur (en ms).....	123
Table V-11 : Moyennes des vitesses d'écriture (et écart-types), en fonction des facteurs de consistance initiale, finale et de longueur (en cm/s).....	124
Table VI-1 : Summary of studies and contrasts included in the meta-analysis.....	146
Table VI-2 : List of significant peaks from the main ALE analysis performed with all included contrasts	151
Table VI-3 : List of significant peaks from the secondary ALE analysis including only contrasts controlling for motor output.....	152
Table VI-4 : List of significant peaks from the secondary ALE analysis including only contrasts controlling for linguistic or sensorial input.....	152
Table VII-1 : Propriétés des items utilisés dans les tâches d'écriture sous dictée et de répétition orale en IRMf en fonction de leur longueur (n = 72).....	173
Table VII-2 : Valeurs moyennes (et écart-types) des latences et durées de production lors des conditions d'écriture sous dictée et de traçage de créneaux en IRMf.....	177
Table VII-3 : Activations significatives pour l'analyse de groupe du contraste « Ecriture sous dictée > Ligne de base ».....	180
Table VIII-1 : Propriétés des 100 items sélectionnés (i.e. images, puis mots-cibles correspondants).....	198
Table VIII-2 : Performances sur les différentes variables dans les tâches de dénomination écrite et de dessin.....	202
Table VIII-3 : Propriétés des items sélectionnés pour la tâche de dénomination écrite d'images en IRMf selon l'âge d'acquisition (précoce vs. tardif).....	205
Table VIII-4 : Activations significatives pour l'analyse de groupe du contraste « Dénomination écrite > Ligne de base ».....	213
Table VIII-5 : Activations significatives pour l'analyse de groupe du contraste « Dénomination écrite > Epellation orale ».....	216

Table IX-1 : Caractéristiques linguistiques des items utilisés dans la tâche d'écriture sous dictée (n = 96) en fonction de leur longueur puis de leur régularité.....	240
Table IX-2 : Valeurs moyennes (et écart-types) des différentes variables recueillies en fonction des différentes conditions dans la tâche d'écriture sous dictée.	244
Table IX-3 : Valeurs moyennes (et écart-types) des différentes variables recueillies en fonction des différentes conditions dans la tâche d'écriture sous dictée.	250
Table IX-4 : Valeurs moyennes (et écart-types) des différentes variables recueillies en fonction des différentes conditions dans la tâche d'écriture sous dictée.	259
Table IX-5 : Valeurs moyennes (et écart-types) des différentes variables recueillies en fonction des différentes conditions dans la tâche de Stroop à l'écrit.	263

ANNEXES

Table des annexes

ANNEXE 1.	ARTICLE : NEUROPHYSIOLOGIE DU LANGAGE : APPORTS DE LA NEURO-IMAGERIE ET ETAT DES CONNAISSANCES	III
ANNEXE 2.	ANNEXES AUX EXPERIMENTATIONS DE PSYCHOLINGUISTIQUE (CHAPITRE V) .	XVII
Annexe 2.1.	Liste des 64 items utilisés dans la première expérimentation en écriture sous dictée	xvii
Annexe 2.2.	Caractéristiques des phonèmes identifiés en position initiale et finale sur l'ensemble de la base lors des calculs de consistance phono-orthographique	xviii
Annexe 2.3.	Valeurs de consistance type et token pour tous les couples phonème-graphème identifiés, en position initiale puis en position finale.	xix
Annexe 2.4.	Liste des 180 items utilisés dans la seconde expérimentation en écriture sous dictée	xxv
ANNEXE 3.	LISTE DES ETUDES ET DES CONTRASTES INCLUS DANS LA META-ANALYSE SUR L'ECRITURE EN NEUROIMAGERIE (CHAPITRE VI)	xxvi
ANNEXE 4.	ANNEXES A LA PREMIERE EXPERIMENTATION EN IRMF (CHAPITRE VII) .	xxviii
Annexe 4.1.	Liste des 72 items utilisés dans les tâches d'écriture sous dictée et de répétition orale de la première expérimentation IRMf.....	xxviii
Annexe 4.2.	Tables statistiques des résultats de l'expérimentation IRMf 1	xxix
ANNEXE 5.	EXPERIMENTATION COMPLEMENTAIRE : DETERMINATION DE LA LATERALISATION FONCTIONNELLE DU LANGAGE EN IRMF	xxxI
ANNEXE 6.	ANNEXES A LA SECONDE EXPERIMENTATION EN IRMF (CHAPITRE VIII) .	xxxiv
Annexe 6.1.	Listes d'items à produire (noms des images) et exemples de stimuli (images) utilisés en IRMf lors des tâches de dénomination écrite et d'épellation orale (âge d'acquisition précoce et tardif »), et lors de la tâche de dessin.	xxxiv
Annexe 6.2.	Tables statistiques des résultats de l'expérimentation IRMf 2	xxxv
ANNEXE 7.	LISTE DES 96 STIMULI UTILISES DANS LA TACHE D'ECRITURE SOUS DICTEE DE L'EXPERIMENTATION rTMS (CHAPITRE IX).....	xxxviii

Annexe 1. Article : Neurophysiologie du langage : apports de la neuro-imagerie et état des connaissances

La publication suivante : Planton, S., & Démonet, J.-F. (2012). Neurophysiologie du langage : apports de la neuro-imagerie et état des connaissances. *Revue de neuropsychologie*, 4(4), 255. doi: 10.3917/rne.044.0255 ; est présentée ci-après dans son intégralité.

Neurophysiologie du langage : apports de la neuro-imagerie et état des connaissances

Neurophysiology of language: contributions from neuroimaging and state of the art

Samuel Planton^{1,2}, Jean-François
Démonet^{1,2,3}

¹ Inserm,
imagerie cérébrale et handicaps
neurologiques UMR 825,
F-31059 Toulouse,
France

² Université de Toulouse, UPS,
imagerie cérébrale et handicaps
neurologiques,
UMR 825,
CHU Purpan,
université Paul-Sabatier,
place du Dr Baylac,
F-31059 Toulouse cedex 9,
France
<samuel.planton@inserm.fr>

³ Université de Lausanne,
CHUV,
centre Leenaards de la mémoire,
département des neurosciences cliniques,
46, rue du Bugnon,
1011 Lausanne,
Suisse

Pour citer cet article : Planton S, Démonet
JF. Neurophysiologie du langage : apports
de la neuro-imagerie et état des connais-
sances. *Rev Neuropsychol* 2012 ; 4 (4) : 255-66
doi:10.1684/nrp.2012.0237

Résumé

La recherche sur l'anatomie des fonctions du langage a connu un extraordinaire essor dans les vingt dernières années, avec le développement de techniques de neuro-imagerie permettant d'observer l'activité du cerveau engagé dans une tâche. Après avoir évoqué les limites des méthodes antérieures seulement basées sur l'étude des lésions, nous présentons une description concise des aires cérébrales associées aux fonctions du langage telles que la perception (parole et lecture), les étapes centrales de traitement (système sémantique et syntaxe) ou encore la production du langage (orale et écrite). La mise en relation d'un nombre considérable de travaux, utilisant principalement l'imagerie par résonance magnétique (IRM) fonctionnelle mais aussi d'autres méthodes de neuro-imagerie, voire de stimulation cérébrale, révèle l'anatomie distribuée et les différents réseaux fonctionnels sous-tendant ces fonctions. Cet exposé de l'état actuel de nos connaissances laisse aussi entrevoir des évolutions futures qui devraient nous permettre d'étendre encore notre compréhension de ces fonctions, tant en ce qui concerne leur anatomie que les interactions neurofonctionnelles qui régissent leur organisation.

Mots clés : neuro-imagerie • langage • lecture • sémantique • parole • écriture

Abstract

Research on the anatomy of language functions has seen tremendous growth in the last 20 years thanks to the development of various neuroimaging techniques, allowing the study of brain activity when engaged in a particular task. The large number of published studies, focusing on the most specific to the most general linguistic processes, enables the establishment of a neurophysiology of language. Here, after briefly reviewing the limitations of previous methods based on the study of brain lesions, we summarized the main findings that relate brain areas to language functions such as language perception (speaking and reading), core processing (semantic system and syntax) and production (oral and written). The comparison and review of the considerable amount of available results, mainly using functional MRI, but also from other neuroimaging or brain stimulation methods reveals the distribution of language functions in the brain and helps to uncover different functional networks underlying these functions. We attempt to present these results by linking whenever possible each cognitive linguistic function to one or more brain areas. This review of actual knowledge from neuroscience research also helps to address classical issues related to the laterality of language or the specificity of language-related areas. We finally argue about how the latest and future developments should help to further expand our understanding, in both the anatomical localization of these functions and in the characterization of the neurofunctional interactions governing its organization.

Key words: neuroimaging • language • reading • semantics • speech • writing

Correspondance :
S. Planton

Nos connaissances sur les substrats cérébraux du langage ont connu une importante évolution depuis les années quatre-vingt avec les progrès des techniques de neuro-imagerie morphologique et fonctionnelle, qui ont permis de renouveler, puis de compléter les connaissances restées longtemps basées sur la méthode anatomoclinique. En dépit de sa valeur fondatrice, et à l'exception de certains exemples bien connus (rôle de l'aire de Broca dans l'expression orale, implication de l'aire de Wernicke dans la compréhension du langage oral), les liens entre structures cérébrales et fonctions du langage suscitent encore bien des interrogations.

En effet, malgré ses contributions cruciales dans le développement de modèles théoriques du fonctionnement du système cognitif langagier à partir de la fin du XIX^e siècle [1, 2], les limites du modèle de l'aphasie sont multiples. Comme celles d'autres fonctions cognitives, les aires du langage sont organisées en réseaux complexes et très interconnectés. Les déficits aphasiques ne résultent donc en général pas simplement de l'atteinte d'une aire corticale spécialisée pour un certain processus linguistique, mais peuvent par exemple relever de l'atteinte de structures moins spécialisées qui lui sont connectées (comme le thalamus ou les noyaux gris centraux). Des phénomènes d'hypométabolisme à distance du site d'une lésion, le plus souvent réversibles, sont en effet observables au moyen de la neuro-imagerie et connus sous le nom de diaschisis. Des lésions anatomiques situées à longue distance des aires spécialisées pour le langage peuvent ainsi affecter les fonctions linguistiques. De plus, malgré le développement massif de tests et d'outils diagnostiques permettant de caractériser au mieux les différents symptômes, la correspondance entre un site lésionnel spécifique et un symptôme particulier est rarement établie. Les liens entre une lésion et des symptômes relèvent en effet plus souvent d'un groupe de régions plutôt que d'une seule aire circonscrite. Une autre difficulté dans l'étude du patient cérébrolésé pour caractériser le réseau neurofonctionnel du langage sain réside dans l'évolution des déficits ; les phénomènes de plasticité fonctionnelle et anatomique précoces et tardifs peuvent largement modifier l'organisation de ce réseau. Ainsi, les syndromes aphasiques décrits résultent souvent de réarrangements neuronaux ayant pris place plusieurs semaines après la lésion, les aphasies dans la phase aiguë étant souvent plus sévères. L'implication de l'hémisphère droit dans le langage chez l'aphasique, mise en évidence par la neuro-imagerie, et son rôle éventuel dans la récupération, est un autre exemple de telles réorganisations fonctionnelles pouvant biaiser l'étude des liens symptôme-lésion. Enfin, certains facteurs individuels, ayant un impact sur le réseau neurofonctionnel du langage identifié en neuro-imagerie tels que le sexe, l'âge, la latéralité manuelle ou le niveau d'alphabétisation, pourraient avoir une influence sur les symptômes aphasiques. Le fait que les atteintes cérébrovasculaires touchent plus fréquemment les sujets âgés pose d'emblée ce type de problème, rendant difficile l'utilisation du modèle de l'aphasie pour décrire le fonctionnement normal.

Toutes ces limites conduisent les chercheurs à s'intéresser de plus en plus à l'exploration de l'activité du cerveau de sujets sains engagés dans une tâche en *temps réel*. Basés sur des principes physiques différents, la tomographie par émission de positons (TEP), l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) et l'électro- ou la magnétoencéphalographie (EEG, MEG) permettent en effet de mesurer les variations de certains indices des activités neuronales en cours émergeant du cerveau « en action ». Avec des résolutions temporelles et spatiales différentes, elles dépeignent l'anatomie fonctionnelle des opérations cognitives, voire décrivent leur déroulement temporel. Le développement de telles techniques de neuro-imagerie fonctionnelle dans les années quatre-vingt a rapidement permis de mettre en question les connaissances sur l'anatomie du langage issues de la neuropsychologie lésionnelle [3, 4]. Leur généralisation et le développement de méthodes et d'outils nouveaux a depuis permis de progresser dans notre compréhension, mais aussi de mettre au jour la complexité de l'organisation des fonctions cognitives langagières au sein du cerveau. La quantité de travaux ayant été publiés en neuro-imagerie fonctionnelle, portant sur les grandes fonctions du langage (compréhension de la parole, lecture, etc.) ou sur les différents processus linguistiques qui les sous-tendent (sémantique, phonologie, syntaxe, etc.), permet déjà de dresser un certain bilan. Les études de méta-analyse, notamment en classifiant, regroupant, quantifiant les résultats de la littérature, nous procurent aujourd'hui une vision globale de plus en plus précise du fonctionnement et des substrats neuronaux de ces fonctions [5, 6]. Le bref aperçu de la « physiologie cérébrale » du langage qui va suivre a pour but de résumer les grandes notions issues des travaux de neuro-imagerie fonctionnelle menés chez l'adulte sain, en examinant tour à tour les corrélats cérébraux des processus en rapport avec les deux grandes voies d'entrée (auditive et visuelle) des stimuli linguistiques, avec l'accès au sens à partir de ces stimuli et enfin avec les processus « de sortie » permettant l'expression des messages (se référer à la *figure 1* ci-après pour une localisation des principales aires cérébrales évoquées tout au long du texte).

■ Perception de la parole

Lors de l'écoute de la parole, l'information auditive est transmise depuis les relais du tronc cérébral vers les régions thalamiques (corps genouillés médians) puis vers le cortex auditif primaire, dans la partie postérieure du gyrus transverse ou gyrus de Heschl, au niveau de la face supérieure du lobe temporal qui est enfouie dans la scissure de Sylvius. Bien que la distribution des voies acoustiques conduise à une répartition bilatérale des informations auditives, il existe une certaine prépondérance croisée des connections entre une oreille et le cortex temporal contralatéral. Par la suite, les entrées auditives seraient traitées à partir du gyrus de Heschl selon un gradient antérolatéral, progressant vers le pôle temporal [7]. Cette progression

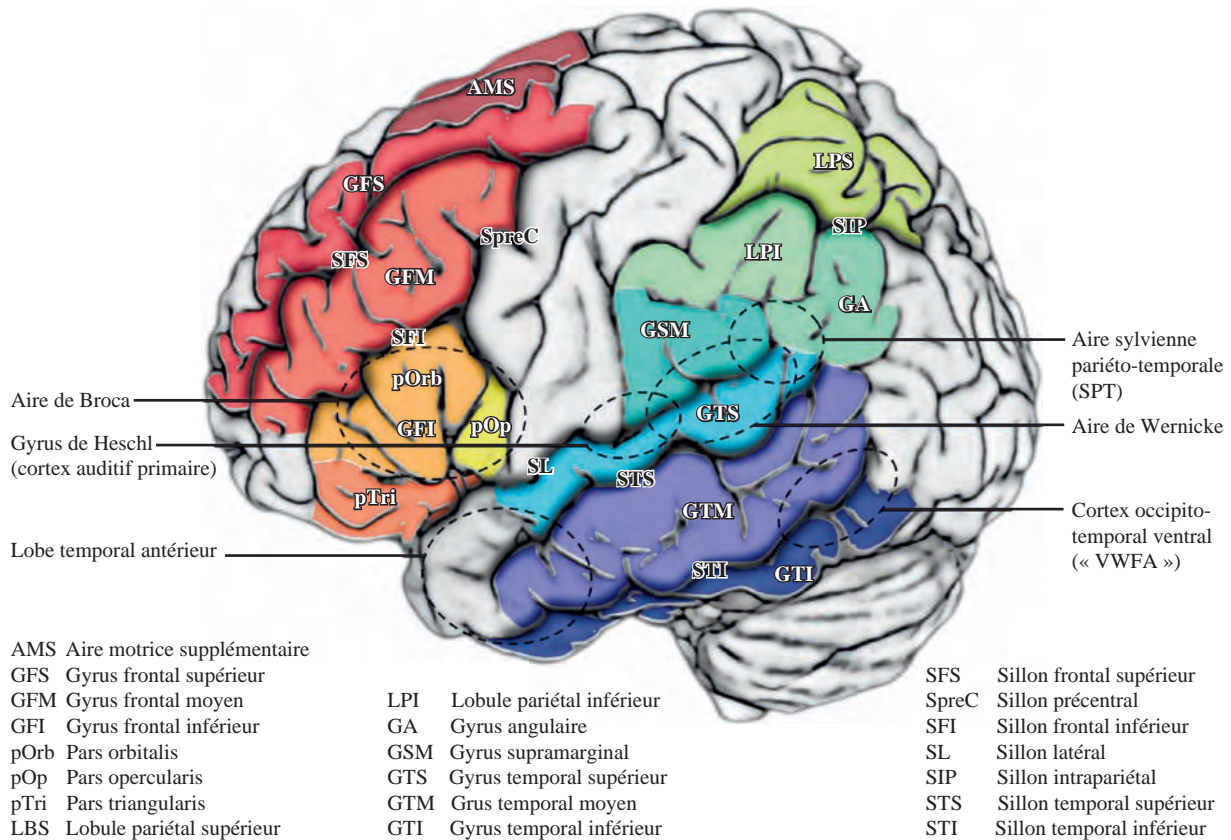


Figure 1. Localisation anatomique des principales régions corticales de l'hémisphère gauche impliquées dans les fonctions du langage.

traduirait la combinaison progressive des caractéristiques auditives de bas niveau en sons de plus en plus complexes, tels les sons de parole. Ainsi, la présentation de voyelles, comparée à la présentation de sons moins complexes, va activer des régions latérales et antérieures au gyrus de Heschl. La latéralisation à l'hémisphère gauche des processus de perception auditive de la parole pose question. La région antérieure du gyrus temporal supérieur (GTS) et du sillon temporal supérieur (STS) des deux hémisphères est en effet souvent considérée comme essentielle à la perception de la parole. En réalité, il semblerait que la sélectivité au langage (par rapport à d'autres sons complexes tels la musique) soit plutôt caractérisée par une plus grande latéralisation à l'hémisphère gauche. Cette latéralisation refléterait à la fois les attentes (« top-down ») de l'auditeur et certains aspects du stimulus ; les transitions auditives rapides sont ainsi traitées de manière privilégiée par la région gauche alors que la région droite est plus sensible aux variations de fréquence sonore [8].

Les travaux de Wise *et al.*, notamment [9, 10], permettent de proposer l'existence de deux voies de traitement de l'information langagière sur entrée auditive, sur le modèle des deux voies « what » et « where » pour le

traitement visuel [11]. Une voie « rostro-ventrale » correspondrait à l'identification d'« objets auditifs », peut-être spécifiques de la parole humaine, mais en tout cas intelligibles ; ce type de traitement cognitif met en exergue le rôle souvent négligé de la partie antérieure du cortex auditif associatif dans le GTS et le STS, alors que l'accent est classiquement mis sur le rôle crucial de l'aire de Wernicke définie comme topographiquement limitée à la portion postérieure du GTS gauche. Cette voie ventrale, plus récemment conceptualisée par Hickok et Poeppel [12], et permettant l'accès au sens serait organisée, du moins dans ses composantes précoces d'accès à la représentation phonologique, en plusieurs routes de traitement parallèles différenciellement latéralisées (impliquant, par exemple, le gyrus temporal moyen postérieur [GTmp] bilatéral et le GTM antérieur [GTMa] gauche).

Réciproquement, la voie « dorsale » inclurait notamment la partie postérieure du GTS gauche (ou l'aire de Wernicke), le planum temporal et la partie inférieure du gyrus supramarginal (GSM) gauche. Cette voie serait en rapport avec un traitement sublexical de l'information linguistique auditive, conduisant à une segmentation en unités phonologiques et donnant lieu à un traitement en mémoire

phonologique à court terme et en mémoire de travail. Elle est ainsi particulièrement sollicitée par le traitement de mots nouveaux ou peu fréquents. Plus généralement, elle représenterait un réseau dédié à l'intégration sensorimotrice auditive, la mémoire de travail verbale ou phonologique n'étant qu'une composante d'un système intégrant les représentations articulatoires aux représentations phonologiques. Contrairement à la voie ventrale, cette voie dorsale, impliquant aussi le lobe frontal postérieur, serait fortement latéralisée à gauche.

Ainsi, l'ensemble de la littérature en neuro-imagerie fonctionnelle montre que le concept unitaire d'aire de Wernicke n'a plus de signification en tant qu'entité au rôle unique si l'on détaille la nature des fonctions précises assumées par les différents sous-territoires corticaux qui se juxtaposent dans cette région temporale supérieure/postérieure. La partie postérieure du GTS gauche, activée lors de la perception ou la production de mots, pourrait ainsi représenter une mémoire de travail stockant des composants sous-lexicaux tels les phonèmes, nécessaire à l'accès à la représentation phonémique. Une aire plus dorsale, à l'intersection du GTS et du GSM, contribuerait au sein de la voie dorsale à l'interface entre les représentations auditives de la parole et leurs homologues motrices.

■ Les deux voies de la lecture

■ Accès à la représentation visuo-orthographique

La lecture est une compétence acquise sous la pression culturelle ; elle est apparue il y a quelques milliers d'années, initialement chez un nombre très restreint d'individus « lettrés ». Il n'est donc pas possible qu'il existe des régions dans le cerveau déterminées génétiquement pour traiter les codes écrits. Il faut au contraire supposer que les mécanismes neuronaux en cause résultent d'une adaptation des structures impliquées dans le traitement d'autres types de stimuli. Là encore, l'imagerie fonctionnelle permet d'identifier le réseau d'aires cérébrales impliqué dans l'activité de lecture.

Après l'implication des aires visuelles primaires (aire de Brodmann [BA] 17) et immédiatement adjacentes, les tâches de lecture donnent lieu d'abord à une activation bilatérale du cortex visuel associatif situé dans la région inférieure et interne du lobe occipital, proche de l'aire V4 (impliquée dans le traitement des informations de couleur), puis à une activation *uniquement à gauche* d'une région située un peu plus en avant dans le gyrus fusiforme, au niveau de la BA 37 qui surviendrait environ 200 ms après la présentation du mot. Certains auteurs ont suggéré que cette zone critique pourrait correspondre à l'étape de traitement de la forme visuelle des mots ; ainsi celle-là est-elle désignée sous le nom de *visual word form area* (VWFA) [13]. Mais la nature de la représentation reflétée par les réponses du cortex occipitotemporal ventral gauche (VWFA) est

sujette à débat. Sa spécificité aux formes visuelles des mots a été beaucoup contestée [14], cette aire se retrouvant activée en imagerie fonctionnelle dans des tâches n'impliquant pas directement le traitement de la forme visuelle des mots. Certains auteurs considèrent qu'elle concerne la représentation orthographique abstraite complète des mots [15], mais d'autres que les réponses du cortex occipitotemporal ventral sont essentiellement visuelles et que la spécialisation aux formes des mots, ainsi que la latéralisation fonctionnelle à gauche, n'émergent que par des processus de rétroaction en provenance des aires du langage en charge du traitement phonologique notamment [16]. Ce phénomène de modulation descendante (*top-down*) a pu récemment être observé dans une tâche requérant une attention sélective sur les aspects phonologiques (décision sur la rime de sons de parole) par rapport aux aspects mélodiques (séquences de notes) de sons complexes ; l'attention sélective pour la parole active, notamment la VWFA (en l'absence de stimulation visuelle) [17].

Le caractère composite de l'anatomie fonctionnelle de la lecture, partiellement déterminée d'ailleurs par la nature même du code considéré (alphabétique ou idéographique), fait écho aux conceptions en psychologie cognitive qui supposent généralement au moins deux processus pour la lecture : un processus d'adressage lexical (s'apparentant à une situation de dénomination) et un processus sublexical d'assemblage des unités graphémiques et de leurs équivalences phonologiques.

■ Accès aux représentations sémantique et phonologique

Au-delà des étapes de décodage des caractères visuels, les modèles psycholinguistiques de la lecture font donc souvent référence à deux voies possibles pour accéder à la prononciation (ou au sens) d'un mot. La voie lexicale ou directe permettrait la récupération directe en mémoire des représentations sémantique puis phonologique d'un mot lu (*via* un lexique orthographique) alors que la voie sous-lexicale ou graphophonologique permettrait de récupérer sa représentation phonologique par assemblage des correspondances entre graphèmes et phonèmes. Ces modèles sont notamment étayés par l'observation de la performance de patients démontrant l'atteinte de l'une ou l'autre voie (e.g., régularisation de mots irréguliers dans la dyslexie de surface ou incapacité à lire des pseudo-mots dans la dyslexie phonologique). Des progrès ont été réalisés dans la caractérisation des réseaux cérébraux pouvant sous-tendre ces deux voies, mais leur ségrégation en deux circuits anatomiquement distincts apparaît encore incertaine. Ainsi, dans une méta-analyse basée sur les résultats d'activation en écriture de mots ou de pseudo-mots issus de 35 études en neuro-imagerie, Jobard *et al.* [18] n'ont pas observé d'aire cérébrale spécifique de la voie d'accès lexicale ou directe. En revanche, les mécanismes de conversion graphème-phonème reposeraient sur plusieurs aires de l'hémisphère gauche : le GTS, le GSM et la pars opercularis

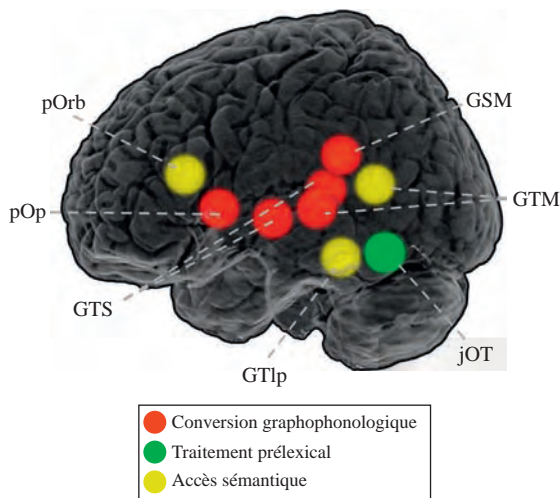


Figure 2. Aires de l'hémisphère gauche impliquées dans la lecture selon les résultats de la méta-analyse de Jobard *et al.* (2003) [18]. pOrb : pars orbitalis ; pOp : pars opercularis ; GTS : gyrus temporal supérieur ; GSM : gyrus supramarginal ; GTM : gyrus temporal moyen ; GTIp : gyrus temporal inférieur (aire temporale basale) ; jOT : jonction occipitotemporale.

(pOp) du gyrus frontal inférieur (GFI) (BA 44) (*figure 2*). Le GSM semble en effet particulièrement impliqué dans des tâches impliquant des pseudo-mots ou des combinaisons de lettres non familières. Il apparaît de plus que les langues « irrégulières » comme l'anglais, requérant davantage l'accès au lexique orthographique, se traduisent dans le cerveau par des activations du gyrus fusiforme gauche (dans la face interne du lobe temporal) et du GFI gauche, alors que des langues plus « transparentes » comme l'italien, favorisant l'usage de la conversion lettre-son, impliquent plutôt le GTS. Le GFI gauche (incluant l'aire de Broca) est fréquemment retrouvé activé dans des tâches impliquant de lire à haute voix, mais aussi lors de la lecture silencieuse. De telles activations ont été associées au traitement phonologique, à la récupération ou à l'analyse des phonèmes. Il apparaît en fait que ces fonctions « phonologiques » seraient restreintes à la pOp (BA 44) alors que la pars triangularis (pTri ; BA 45) refléterait plutôt les processus lexico-sémantiques de la tâche de lecture. Cette dernière aire est ainsi impliquée dans l'étape ultime des deux voies de la lecture qui est l'accès au sens des mots, procuré par le système sémantique.

■ Système sémantique

L'exploration des substrats cérébraux de la mémoire sémantique ou des processus sémantiques en neuro-imagerie a conduit à la mise en évidence d'un vaste réseau essentiellement latéralisé à l'hémisphère gauche. Ainsi, les tâches de compréhension sémantiques impliquent en

particulier le cortex temporal inférieur, le cortex temporal postérieur et moyen (dont le gyrus angulaire [GA]) ainsi que les aires associatives frontales. La méta-analyse de Jobard *et al.* [18] avait rapporté que l'accès au sens des mots lus impliquait en effet la partie postérieure du GTM mais aussi la pTri du GFI (BA 45) et la partie postérieure du gyrus temporal inférieur (GTI). Cette dernière correspondrait à l'aire du langage temporelle basale (aires de Brodman 19, 37 et 20), une région qui serait impliquée dans notre capacité à organiser le monde en catégories distinctes et dont la lésion ou la stimulation électrique peut produire des déficits sémantiques spécifiques d'une catégorie. Cette aire est considérée comme l'une des régions centrales du système sémantique, supposées implémenter le traitement sémantique indépendamment de la voie d'accès, avec le cortex pariétal inférieur (BA 39) et le cortex frontal latéral (BA 44, 45 et 47).

■ Un système sémantique amodal

Par un semblable travail de méta-analyse, Binder *et al.* [19] ont cherché à localiser les aires les plus fréquemment rapportées comme impliquées dans le système conceptuel ou l'accès à ce système, quel que soit le type de tâche, et de préciser leurs fonctions spécifiques. Parmi les aires décrites, le lobe pariétal inférieur (LPI), incluant le GA, serait une région de haut niveau, impliquée dans l'intégration conceptuelle. Les cortex temporal ventral et latéral (incluant notamment le GTM, le GTI, le gyrus fusiforme, mais aussi le GTS) sous-tendraient des fonctions de récupération conceptuelle. Le cortex préfrontal dorsomédial gauche (approximativement BA 8), une aire souvent absente des descriptions du système sémantique, jouerait un rôle dans la fluence de la récupération sémantique. Au niveau du GFI, il semble que ce soit sa partie antérieure-ventrale, la pars orbitalis (pOrb ; BA 47), qui soit la plus concernée par les processus sémantiques. Il apparaît en effet qu'une stimulation électrique de cette zone (en utilisation la technique de stimulation magnétique transcrânienne [TMS]) affecte spécifiquement la performance dans une tâche de décision sémantique. Les activations du cortex préfrontal ventromédial (gyrus cingulaire, GTS médial, cortex orbitofrontal médial) dans des tâches sémantiques relèveraient de la signification affective des concepts. Enfin, le gyrus cingulaire postérieur, une région notamment associée à l'encodage de la mémoire épisodique, s'avère aussi souvent activé lors du traitement sémantique. Selon les auteurs, cela serait peut-être un indice de l'importance du système conceptuel dans les mécanismes d'encodage épisodique. Pour résumer, le système sémantique reposerait sur trois groupes d'aires cérébrales : le cortex associatif hétéromodal (ou amodal) postérieur (GA, cortex temporal latéral et gyrus fusiforme), représentant plutôt les aires de stockage des connaissances, plutôt concrètes et « perceptuelles », le cortex préfrontal hétéromodal (cortex préfrontal dorsal, ventromédial et inférieur), plutôt impliqué dans la récupération sémantique et les connaissances de nature verbale,

et les régions paralimbiques et médiales, plutôt concernées par l'encodage de connaissances abstraites multimodales, d'origine épisodique (*i.e.*, issues de l'expérience).

La littérature neuropsychologique pointe cependant aussi l'importance des lobes temporaux antérieurs (LTA) dans le système sémantique, ce qui semble être confirmé par certains résultats en TMS répétitive (rTMS) chez le sujet sain. La partie antérolatérale du lobe temporal est particulièrement atrophique, bilatéralement quoique non symétriquement, dans la démence sémantique, un trouble dégénératif dont il a été montré qu'il affectait la mémoire sémantique quelle que soit la modalité d'accès, verbale ou non verbale. Les activations de cette région ne sont pourtant pas toujours rapportées dans les études en neuro-imagerie, ce qui s'expliquerait par plusieurs raisons allant de la nature du signal recueilli par l'IRMf, aux paramètres d'acquisition, jusqu'à l'utilisation d'une tâche contrôle appropriée. Des activations du LTA gauche et droit sont tout de même rapportées quelle que soit la nature des stimuli (mots, images), renforçant là encore l'hypothèse d'un centre sémantique amodal dans cette région bilatérale, qui serait cependant connecté avec des régions plus spécifiques à certaines modalités ou certaines catégories (*cf. infra*).

■ Dissociation noms-verbes

Il a souvent été proposé que le système sémantique puisse être organisé de telle manière que différentes aires cérébrales sous-tendent différentes catégories sémantiques ou différentes catégories grammaticales. L'existence d'une double dissociation dans l'aphasie entre noms et verbes – certains patients souffrant de déficits affectant particulièrement les verbes tout en préservant les noms, d'autres patients présentant le pattern inverse – a ainsi beaucoup été questionnée. Shapiro *et al.* [20] ont comparé en neuro-imagerie les activations issues de tâches de production de verbes et de production de noms (en contrôlant les aspects sémantiques ou les propriétés sensorimotrices des mots par l'utilisation conjointe de pseudo-mots). Ils rapportent la présence d'activations plus fortes du cortex préfrontal gauche, du lobule pariétal supérieur (LPS) gauche et du GTS gauche pour la production de verbes, et des activations plus importantes du gyrus fusiforme antérieur pour la production de noms. Mais selon Vigliocco *et al.* [21], cette dissociation n'émerge que lorsque des processus d'intégration du mot dans le contexte d'une phrase, en particulier lors de la production, sont engagés. Ces derniers impliquent particulièrement le GFI gauche et le gyrus frontal moyen (GFM) gauche. L'hypothèse d'une ségrégation neurale entre noms et verbes en tant que catégories lexicales ne serait ainsi pas démontrée. Les différences obtenues, en particulier dans le GFI gauche, relèveraient en fait de plus grandes demandes de traitement morphosyntaxiques pour les verbes.

■ Dissociations catégorielles

Les données de la neuropsychologie démontrent aussi l'existence de séparations entre différentes catégories

sémantiques, des patients souffrant de déficits sémantiques sélectifs pour les animaux, d'autres pour les objets manufacturés. En neuro-imagerie, on observe des patterns d'activation différents au sein de la voie visuelle ventrale, dans le cortex temporal ventral postérieur, entre différentes catégories telles les visages, les bâtiments, les animaux ou les objets manufacturés. Ces données ne sont cependant pas incompatibles avec une conception du système sémantique, aujourd'hui de plus en plus dominante, soutenant que les connaissances sont organisées au sein du système cognitif en fonction de leurs propriétés sensorielles (*e.g.*, forme, couleur, mouvement) ou de leurs propriétés motrices (*e.g.*, se servir de l'objet) (on parle de « cognition incarnée »). Les distinctions entre différentes catégories sémantiques n'émergeraient que par des différences entre les propriétés particulières qui individualisent chaque catégorie par rapport aux autres. Les mots référant à des objets visuellement définis activent des aires de la voie temporelle inférieure de reconnaissance des objets, quand les mots référant à des actions activent plutôt des aires temporales et frontales liées à la représentation de l'action [22]. Il est ainsi rapporté que la perception et l'activation des connaissances d'objets « animés » (*i.e.*, entités vivantes, caractérisés par le mouvement biologique) reposent sur le gyrus fusiforme latéral pour leur aspect visuel et sur le STS postérieur (pSTS) pour leur mouvement [23]. Celles des outils ou des objets inanimés reposeraient sur le gyrus fusiforme médial, ainsi que sur le GTMp, le sillon intrapariétal (SIP) et le cortex prémoteur ventral (VPMc). Ces aires représentent leurs propriétés visuelles mais aussi et surtout leurs propriétés motrices ou liées à l'action.

■ Syntaxe et phrases

Bien qu'il constitue évidemment le niveau de fonctionnalité réelle du langage et à cause de sa complexité, relativement peu d'études ont été consacrées au traitement des phrases, si l'on excepte les travaux portant sur les processus syntaxiques. S'agissant de ces derniers, les travaux systématiques de Caplan *et al.* [24] ont confirmé la notion aphasiologique d'un rôle spécifique de l'aire de Broca pour le traitement de l'information syntaxique, en montrant, plus précisément, une activation focalisée lors de tâches de vérification de phrases complexes (comportant, par exemple, des propositions relatives) et ce quel que soit le rôle surajouté à ce niveau des effets (évidents) liés à l'implication de la boucle articulatoire. Pourtant, il est souvent difficile de savoir en neuro-imagerie si les activations obtenues reflètent des processus spécifiques de la grammaire et de la syntaxe ou d'autres processus de mémoire de travail ou d'analyse sémantique. En manipulant la complexité sémantique, d'une part, et la complexité syntaxique, d'autre part, une distinction a néanmoins pu être établie entre la pOp (BA 44) qui serait concernée par le traitement de l'information syntaxique, et la pOrb (BA 47), impliquée dans le traitement des aspects sémantiques de la phrase

[25]. Ce résultat a ensuite été répliqué avec une tâche plus implicite de présentation de phrases contenant des erreurs syntaxiques (du type : *Trees can grew – Les arbres peuvent grandi*) ou sémantiques (*Trees can eat – Les arbres peuvent manger*) [26].

L'organisation des mots dans la phrase est aussi importante pour la compréhension des phrases que pour leur production. Selon différentes études, l'encodage syntaxique dans la production de phrases entraîne une activation dans l'opercule rolandique antérieur gauche, postérieurement à l'aire de Broca (BA 44), d'autant plus importante que la syntaxe est complexe, ou plus particulièrement l'aire BA 45 gauche (au sein d'un réseau impliquant aussi l'aire BA 44, le gyrus frontal médian, le LPS et l'insula). D'autres travaux, portant cette fois sur la compréhension de phrases, rapportent aussi une activation du GTM gauche, qui serait impliqué dans le maintien de l'information lexicale et syntaxique, alors que le GFI postérieur gauche permettrait l'intégration ou l'unification des différents éléments de la phrase en une représentation cohérente. Les traitements syntaxiques pendant la production de phrases ou pendant la compréhension reposeraient finalement sur les mêmes groupes neuronaux. Segaert *et al.* [27] rapportent en effet, à l'aide d'un paradigme d'amorçage combinant des conditions de compréhension et de production syntaxique, que les mêmes aires présentent des phénomènes d'adaptation en IRMf (l'aire BA 45, ainsi que GTM gauche et l'aire motrice supplémentaire [AMS]).

Par-delà la connaissance du sens des mots et la prise en compte de leur intégration *via* des règles syntaxiques, le sens d'un message peut parfois être « dissimulé » de manière non littérale au travers d'images ou de métaphores. L'observation de patients souffrant spécifiquement de troubles du langage figuratif suite à une lésion droite a initialement conduit à faire de la compréhension des métaphores une fonction spécifique de l'hémisphère droit. Plusieurs travaux en neuro-imagerie ont remis en cause cette hypothèse [28] et suggèrent aujourd'hui plutôt l'implication de régions des deux hémisphères, apportant chacune leur contribution à cette compétence qui repose sur plusieurs processus ou sous-systèmes cognitifs. Ainsi, les aspects conceptuels de la compréhension des métaphores (aspects linguistiques et mise en relation avec le contexte) seraient supportés par le GFI bilatéral et le GA gauche, les aspects attentionnels (filtrage des aspects pertinents du contexte, sélection du sens approprié) par le cortex cingulaire antérieur et les aires préfrontales, puis la reconnaissance des intentions du locuteur par le STS droit [29]. D'autres travaux rapportent aussi l'implication du LTA gauche, de l'insula droite ou encore du thalamus. Des aires de l'hémisphère droit (en particulier le GFI droit) semblent donc tout de même jouer un rôle linguistique spécifique. Un rôle qui, selon certaines hypothèses, serait lié à l'intégration des connaissances à long terme et à la construction d'un contexte – au-delà du mot et de la phrase (au niveau plus large du discours) –, ou encore au traitement des significations les moins familières ou les moins conventionnelles des mots.

■ Expression du langage

■ Production orale

L'expression orale du langage fait appel à de nombreux processus qui vont des traitements conceptuels de l'élaboration du message à l'articulation motrice. Le traitement conceptuel repose sur les aires de traitement et de stockage sémantique déjà décrites et aussi impliquées dans la compréhension du langage. L'étape ultérieure de récupération des mots a, elle, été étudiée dans des tâches de génération de mots, contrôlant pour les aspects articulatoires ; ce type de tâche active principalement les GFM et GFI gauche, incluant la pOp (BA 44), la pTri (BA 45) et le sillon frontal inférieur (SFI). Mais seul le GFM serait impliqué dans la récupération de la forme des mots en mémoire lexicale, plutôt que dans leur compréhension. L'activité de la pOp relèverait davantage des processus liés au séquençage des phonèmes ou au codage articuloire des séquences à produire.

Les corrélats des processus phonologiques et articulatoires de l'expression orale ont été relativement peu étudiés pour eux-mêmes, car il peut être difficile de concevoir des expériences permettant de dissocier ces différents sous-processus. Lorsque la parole est produite, les activations augmentent typiquement de manière essentiellement bilatérale dans les cortex moteur et prémoteur, l'AMS (pré-AMS), le GTS, le cervelet, l'insula antérieure, ainsi que dans le cortex temporopariétal gauche et le putamen gauche [30]. L'aire de Broca ne serait en effet pas concernée par l'exécution de programmes articulatoires mais plutôt par des processus phonologiques « situés » en amont. La pOp ventrale (BA 44) a en particulier été impliquée dans la séquentiation phonologique et la mémoire de travail. Il faut ajouter que le cervelet, notamment dans ses secteurs vermiens et certaines portions de son cortex hémisphérique droit, joue probablement un rôle important dans l'ensemble des processus d'expression du langage, y compris articulatoires. La production orale apparaît aussi nécessiter un « feedback » auditif pour guider et maintenir la production articuloire. Ainsi, des manipulations artificielles sur le retour perçu de sa propre voix (tel un retour auditif retardé) entraînent des modulations compensatoires dans la parole. Ce guidage, nécessaire à l'apprentissage, traduit l'implication d'un système d'intégration sensorimotrice pour la parole qui reposerait, selon Hickok [31] sur une aire pariéto-temporale postérieure (nommée SPT pour aire sylvienne pariéto-temporale). Cette aire serait ainsi nécessaire à l'expression orale, mais sa lésion n'affecterait pas les processus de compréhension de la parole.

■ Production écrite

L'expression écrite du langage est encore relativement peu étudiée en neuro-imagerie par rapport à sa modalité orale. Plusieurs travaux récents mettent néanmoins en

évidence un réseau d'aires cérébrales, à la fois communes à d'autres tâches motrices ou à d'autres tâches langagières, mais aussi spécifiques de la production écrite. Ainsi, les tâches d'écriture font apparaître des activations du LPS, du cortex préfrontal inférieur et supérieur gauche, du cortex temporal postérieur/inférieur, du GSM, du cervelet droit, ainsi que des aires motrices primaire et AMS [32]. Il est intéressant de noter que l'on retrouve des activations de l'aire temporale postérieure/inférieure, particulièrement dans l'écriture de caractère idéographiques japonais – une aire qui semble correspondre à celle parfois associée au traitement de la forme visuelle ou orthographique des mots dans la lecture (la VWFA). Tout comme pour la lecture, mais dans un « sens » différent, la conversion de phonèmes en graphèmes est impliquée dans l'écriture. Selon Omura *et al.* [33], ce processus spécifique reposerait sur une aire prémotrice inférieure, s'étendant à l'aire de Broca, en effet souvent incluse dans les réseaux d'activation de l'écriture. L'utilisation de tâches contrôles orales (répétition) et motrices (traçage de cercles) a permis de mettre en évidence une aire plus spécifique de la production écrite. Cette aire, dénommée GMFA pour *graphemic motor/frontal area* par Roux *et al.* [34], située à l'intersection du sillon frontal supérieur (SFS) et du sillon précentral (SpreC), serait impliquée dans un rôle d'interface entre les représentations graphémiques abstraites et la programmation motrice [34, 35]. Celle-ci pourrait correspondre à l'aire d'Exner, traditionnellement associée à l'agraphie. Plusieurs travaux pointent aussi l'importance de l'aire pariétale supérieure gauche (SIP antérieur ou LPS), aussi impliquée dans le syndrome d'agraphie pure, mais dont la fonction spécifique reste incertaine [35]. On peut aussi noter que ce réseau cérébral de l'écriture est aussi activé dans la forme moderne de l'écriture qu'est l'écriture avec un clavier d'ordinateur [36]. Ces données d'imagerie confirment donc une certaine indépendance des processus cognitifs permettant la sortie écrite du langage, par rapport à sa sortie orale. Des travaux supplémentaires sont pourtant requis pour préciser ces données et étudier le rôle de ces aires dans des dysfonctionnements ou pathologies affectant la production écrite.

■ Anatomie fonctionnelle du langage : questions à résoudre et avancées récentes

■ Spécificités du réseau cérébral du langage : dissociations inter- et intrahémisphériques

Le constat de la diversité des aires cérébrales ayant été impliquées dans les fonctions cognitives langagières amène à se poser la question de la spécificité réelle de certaines régions dans les fonctions du langage et à tenter d'établir une vision globale cohérente de ce réseau cérébral. L'idée de la dominance de l'hémisphère gauche pour le langage

en particulier nous vient des origines de la neuropsychologie. Cette interrogation est encore aujourd'hui pertinente en vertu des relations incontestables entre aphasie et lésion gauche. Cette asymétrie proviendrait d'une capacité spécifique de traitement des signaux acoustiques rapides par l'hémisphère gauche (hypothèse « temporelle »), ou d'un rôle de stockage des représentations phonémiques, permettant la catégorisation des sons du langage (hypothèse « catégorielle »). Pourtant, en neuro-imagerie fonctionnelle, les activations suscitées par des tâches langagières sont rarement restreintes à l'hémisphère gauche (pour une méta-analyse des activations dans l'hémisphère droit, voir [37]). Selon Démonet *et al.* [38], une moindre asymétrie en faveur de l'hémisphère gauche tend à être associée aux entrées auditives plutôt que visuelles, aux stimuli figuratifs plutôt que symboliques, au traitement des mots plutôt qu'au traitement des phrases ou de la syntaxe ainsi qu'aux tâches de compréhension plutôt qu'aux tâches de production. Les fonctions latentes de l'hémisphère droit pourraient aussi permettre des phénomènes de compensation dans la récupération de l'aphasie [38]. Selon certaines conceptualisations, les « activations » obtenues en imagerie refléteraient en fait les aires impliquées dans la tâche ou *suffisantes* pour celle-ci, alors que seuls les modèles lésionnels permettraient de révéler les aires *nécessaires* à sa réalisation. Les aires de l'hémisphère droit apporteraient donc une contribution dans certaines compétences langagières mais ne seraient normalement pas indispensables à leur bon déroulement. Un rôle « annexe », mais néanmoins spécifique, a néanmoins été longtemps postulé pour l'hémisphère droit dans le langage. Le traitement des aspects émotionnels du langage (au travers de la prosodie) a notamment été associé à cet hémisphère (en particulier *via* l'implication du STS droit). Cependant, comme pour le cas de la compréhension des métaphores évoqué précédemment, les études de neuro-imagerie récentes rapportent que ces fonctions particulières sont loin de reposer uniquement sur des aires de l'hémisphère droit [39].

La littérature neuropsychologique et lésionnelle a aussi souvent présenté des dissociations anatomofonctionnelles entre les fonctions linguistiques et non linguistiques. Pourtant, certaines aires du langage ont pu aussi être impliquées en neuro-imagerie dans des fonctions telles que le traitement de la musique, la mémoire de travail, la pensée mathématique ou le « contrôle cognitif ». Des résultats acquis en comparant des cartes d'activation individuelles dans plusieurs tâches tendent à montrer que les activations issues de tâches langagières sont bel et bien différentes de celles issues de telles tâches non linguistiques, même si certains chevauchements émergent parfois. Cela suggère donc que les computations réalisées par le système cognitif du langage relèvent bien pour la plupart des ensembles neuroaux fonctionnellement spécialisées pour ces tâches, mais qu'il peut exister dans certains cas des recouvrements avec d'autres compétences, comme en particulier le traitement de la musique.

Plusieurs des travaux présentés ici proposaient l'existence, au sein du réseau sous-tendant les différentes fonctions du langage, d'une dichotomie ventrale/dorsale, analogue à l'organisation du système visuel décrite par Ungerleider et Mishkin (voie ventrale du *what* et voie dorsale du *where/how*) [11]. Ainsi, dans la lecture, certains résultats sont en faveur de l'idée d'un flux dorsal dédié aux traitements phonologiques, débutant au niveau de la jonction occipitotemporale inférieure et progressant vers la région temporelle supérieure et le GSM pour aboutir dans le GFI gauche. La voie lexicale directe impliquerait la partie postérieure du GTM gauche, mais aucune distinction avec la voie précédente n'a pu être observée dans le GFI. Concernant la reconnaissance auditive de la parole, une voie ventrale incluant le STS antérieur (aSTS) et le GTS gauche serait dédiée à l'accès à des « objets auditifs », à des représentations phonologiques assemblées permettant l'accès au sens. La voie dorsale inclurait le GTM et supérieur/postérieur gauche, l'aire SPT, le GSM et le lobe frontal postérieur et jouerait un rôle d'intégration auditivomotrice (plutôt qu'un rôle de localisation des sons). Cette dernière voie, impliquant des mécanismes d'extraction et de stockage de niveau infra-lexical, serait donc davantage impliquée dans la production du langage. La dichotomie ventral/dorsal a aussi été étendue aux subdivisions fonctionnelles au sein de la région frontale inférieure/postérieure (région de Broca). En effet, deux faisceaux anatomiques relient, d'une part, les structures dorsales du système auditif et le cortex pariétal inférieur à la partie dorsale du GFI postérieur (*i.e.*, pOp ; BA 44) (*via* le faisceau arqué), d'autre part, le cortex auditif associatif ventral à la partie ventrale du GFI postérieur (pTri ; BA 45 et pOp ; BA 47) (*via* les faisceaux occipitofrontal et unciné). Cette subdivision se retrouverait au niveau fonctionnel par un rôle dans le traitement phonologique pour l'aire BA 44 contre un rôle dans les processus lexico-sémantiques pour les aires BA 45 et BA 47. Pourtant, il est difficile d'étendre cette distinction à d'autres fonctions langagières importantes sous-tendues par cette même région. Ainsi, la prépondérance pour les aspects syntaxiques de la phrase souvent dévolue à l'aire BA 44, par opposition aux aires BA 45 et BA 47 n'est, on l'a vu, pas nécessairement observée. Quoi qu'il en soit, les traitements syntaxiques ou grammaticaux pourraient émerger de l'intégration des informations provenant de différentes sources *via* la convergence des voies ventrales et dorsales dans le cortex frontal gauche.

■ Apports de nouveaux outils d'étude

L'essor qu'a connu l'étude de la neurophysiologie du langage avec l'avènement des techniques modernes de neuro-imagerie n'implique pas que nous disposons depuis lors des outils suffisants pour parfaire ces connaissances. En effet, basées sur des méthodes d'acquisition ou de traitement d'images fonctionnelles ou anatomiques, ou sur la stimulation électrique ou magnétique du cortex,

de nombreuses techniques nouvelles apportent un éclairage complémentaire à ce champ d'étude. La TMS est une technique consistant à induire des impulsions électriques dans le cortex cérébral à travers le crâne *via* une bobine induisant des changements rapides de champ magnétique. La TMS est un outil désormais bien établi dans le champ des neurosciences cognitives, utilisé notamment selon un paradigme répétitif (rTMS) permettant de créer des « lésions virtuelles » temporaires chez des sujets sains [40]. Le langage fait partie des fonctions cognitives aujourd'hui étudiées *via* cette technique. Un arrêt sélectif de la parole spontanée peut par exemple être provoqué en stimulant à basse fréquence la région frontale postérieure/inférieure (correspondant au cortex moteur de la face). Une telle stimulation basse fréquence (généralement 1 Hz) est supposée diminuer l'excitabilité corticale et ainsi inhiber l'activité de la région visée, quand une stimulation de plus haute fréquence (généralement au-delà de 10 Hz) aurait des effets inverses. Toutefois, une stimulation basse fréquence de l'aire de Wernicke (mais pas celle de l'aire de Broca) pendant la réalisation d'une tâche améliorerait paradoxalement les performances de perception de la parole (peut-être en lien avec des effets à distance de la stimulation) (*figure 3*) [41]. D'autres résultats tendent à montrer que la stimulation rTMS haute fréquence, toujours chez des sujets sains, de la partie antérieure du GFI gauche (pOrb) perturberait davantage les aspects sémantiques [42] quand une stimulation plus postérieure (pOp) affecterait plutôt les aspects phonologiques [43]. Bien que ses effets varient selon les paramètres du protocole utilisé (*i.e.*, intensité, haute ou basse fréquence, stimulation avant ou pendant la réalisation d'une tâche), et que ces effets réels restent difficiles à appréhender, cette technique parvient donc à confirmer et à compléter les résultats en neuro-imagerie démontrant des dissociations fonctionnelles entre les différents territoires du GFI. Les capacités de la TMS à moduler l'activité cérébrale de manière non invasive sont aussi beaucoup utilisées chez les patients cérébrolésés ou les patients psychiatriques avec une visée clinique de réhabilitation. Dans le cas de l'aphasie, l'observation de suractivations des équivalents droits de l'aire de Broca ou des régions langagières péri-sylviennes a conduit à la proposition de l'utilisation de la rTMS basse fréquence pour restaurer une certaine « balance interhémisphérique ». Une telle stimulation inhibitrice de la pTri de l'hémisphère droit chez des patients aphasiques a été décrite comme bénéfique dans des tâches de dénomination [44]. Une technique de stimulation similaire quoique bien moins focale, la stimulation transcrânienne directe par courant continu (tDCS), permet d'obtenir des résultats semblables.

Comme on l'a vu, les fonctions du langage sont organisées sous la forme d'un réseau de nombreuses aires cérébrales interconnectées anatomiquement et interagissant fonctionnellement. Plusieurs approches sont aujourd'hui utilisées pour dévoiler l'architecture de ce réseau. La méthode de modélisation dynamique causale (*dynamic*

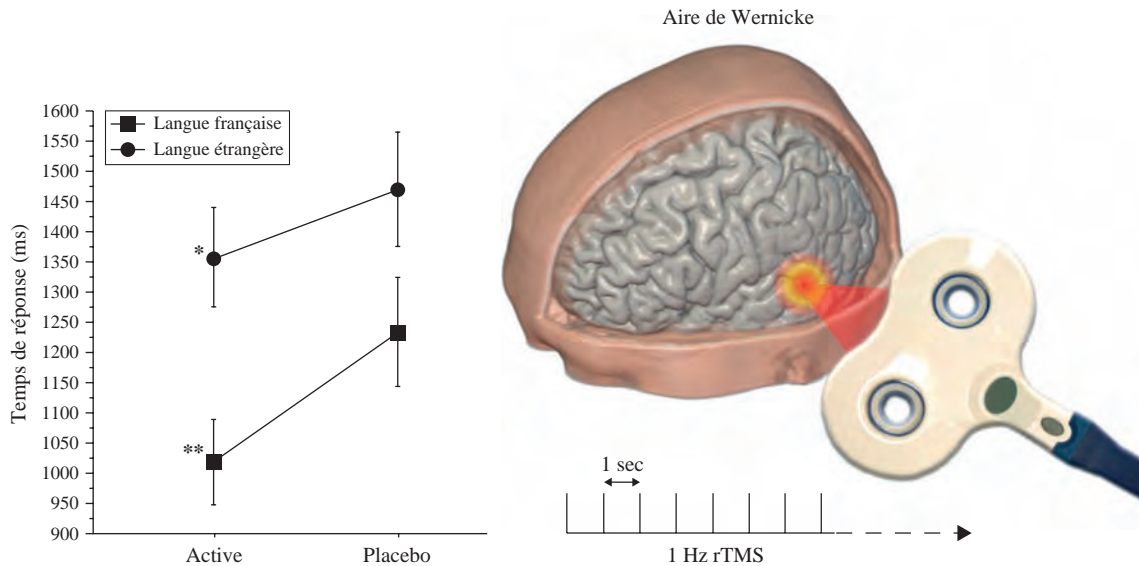


Figure 3. Illustration de l'impact d'une stimulation rTMS de l'aire de Wernicke sur les performances à une tâche de reconnaissance auditive en langue française et en langue étrangère (adapté de Andoh *et al.*, 2006 [41]).

causal modelling [DCM]) permet, par exemple, d'estimer la connectivité effective entre plusieurs aires cérébrales (l'influence d'une région cérébrale sur une autre) à partir de données d'imagerie fonctionnelle. Cette méthode n'implique pas qu'il existe nécessairement une connexion anatomique directe entre les aires cérébrales considérées mais permet de mettre en évidence une influence causale de l'activité d'une aire sur celle d'une autre par la mesure fonctionnelle pendant la réalisation d'une tâche. Leff *et al.* [45] ont, par exemple, pu caractériser la dynamique des couplages d'activité entre trois aires activées lors l'écoute de la parole (le pSTS et aSTS, et la pOrb du GFI). Des couplages d'activité différents peuvent être ainsi mis en

évidence selon la nature des processus en jeu (notamment entre processus sémantiques et phonologiques en lecture). En outre, la méthode de tractographie, qui permet d'étudier la connectivité anatomique du réseau cérébral (fibres de substances blanches connectant les différentes aires cérébrales entre elles), peut aussi être utilisée en complément de cette connectivité fonctionnelle. Saur *et al.* [46], en utilisant une telle combinaison de méthodes, ont ainsi pu décrire différents réseaux interconnectés et impliqués dans les traitements phonologiques (GTS postérieur et ses connexions avec le gyrus précentral et la pOp), ou dans les traitements sémantiques (GTM et ses connexions avec le cortex pré-frontal) (figure 4).

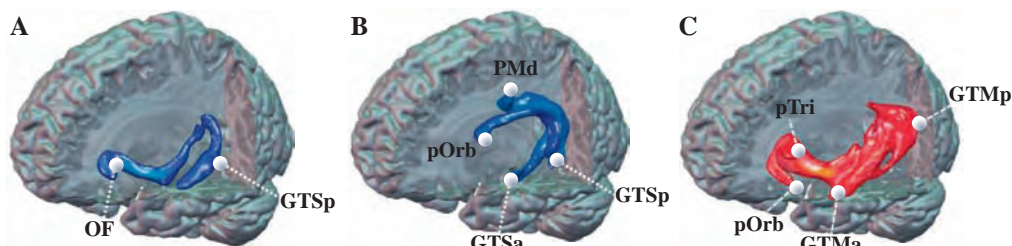


Figure 4. Illustrations des réseaux de fibres sous-tendant la connectivité fonctionnelle dans un réseau phonologique (A, B) et dans un réseau sémantique (C) lors de l'écoute de la parole. OF : opercule frontal ; GTSp/a : gyrus temporal supérieur postérieur/antérieur ; PMd : cortex prémoteur dorsal ; pOrb : pars orbitalis ; pTri : pars triangularis ; GTMp/a : gyrus temporal moyen postérieur/antérieur (adapté de Saur *et al.*, 2010 [46]).

Conclusion

Les fonctions langagières recouvrent tout un ensemble de compétences qui se reflète dans une organisation neuro-fonctionnelle complexe dont il est encore difficile d'avoir une complète appréhension. À la suite des travaux de la neuropsychologie lésionnelle, les nombreux résultats issus des méthodes de neuro-imagerie ont permis de faire énormément progresser nos connaissances sur l'architecture fonctionnelle du réseau cérébral sous-tendant les fonctions langagières. La multiplication des observations en neuro-imagerie, leurs répliquations et leurs mises en relation dans des méta-analyses permettent en effet de mettre en évidence la remarquable stabilité de l'anatomie fonctionnelle du langage entre les individus. Des méthodologies récentes permettent en outre d'avancer vers une approche toujours plus complète et plus précise intégrant la notion d'interaction au sein de ce réseau. Ces techniques permettent d'accéder à des informations nouvelles, telles que la causalité dynamique (quelle aire cérébrale agit sur telle autre), de révéler l'architecture du réseau fonctionnel

(concept de nœud central), ou de démontrer la nécessité de l'implication d'une structure particulière dans un processus (par son inhibition électrique, par exemple). Cela dépasse la recherche de simples correspondances entre aires cérébrales et processus cognitifs, qui a montré ses limites. Une approche combinant données fonctionnelles et anatomiques pourrait aussi permettre de mieux comprendre le lien entre une lésion cérébrale et les symptômes en résultant (lien entre nœud central et concept de « lésion critique »). La connaissance du réseau neurofonctionnel « normal » du langage est en effet cruciale pour le diagnostic mais aussi l'étude et le traitement de ses troubles et dysfonctions. La neuro-imagerie peut notamment être utilisée pour étudier la question de la plasticité et caractériser les phénomènes de réorganisation neurofonctionnelle du réseau, à l'échelle de l'individu, tant dans le contexte d'une lésion cérébrale que lors du vieillissement normal ou pathologique. ■

Conflits d'intérêts

Aucun.

Références

1. Wernicke C. *Der aphasische symptom complex*. Breslau, Poland : Cohen and Weigert, 1874.
2. Broca P. Remarque sur le siège de la faculté du langage articulé, suivie d'une observation d'aphémie (perte de la parole). *Bull Soc Anat Paris* 1861 ; 36 : 330-56.
3. Wise R, Chollet F, Hadar U, et al. Distribution of cortical neural networks involved in word comprehension and word retrieval. *Brain* 1991 ; 114(Pt 4) : 1803-17.
4. Petersen SE, Fox PT, Posner MI, et al. Positron emission tomographic studies of the cortical anatomy of single-word processing. *Nature* 1988 ; 331 : 585-9.
5. Price CJ. A review and synthesis of the first 20 years of PET and fMRI studies of heard speech, spoken language and reading. *Neuroimage* 2012 ; 62 : 816-47.
6. Vigneau M, Beaucois V, Hervé PY, et al. Meta-analyzing left hemisphere language areas: phonology, semantics, and sentence processing. *Neuroimage* 2006 ; 30 : 1414-32.
7. Rauschecker JP, Scott SK. Maps and streams in the auditory cortex: nonhuman primates illuminate human speech processing. *Nat Neurosci* 2009 ; 12 : 718-24.
8. Zatorre RJ, Belin P, Penhune VB. Structure and function of auditory cortex: music and speech. *Trends Cogn Sci* 2002 ; 6 : 37-46.
9. Scott SK, Blank CC, Rosen S, et al. Identification of a pathway for intelligible speech in the left temporal lobe. *Brain* 2000 ; 123(Pt 12) : 2400-6.
10. Wise RJ, Scott SK, Blank SC, et al. Separate neural subsystems within 'Wernicke's area'. *Brain* 2001 ; 124(Pt 1) : 83-95.
11. Ungerleider LG, Mishkin M. Two cortical visual systems. In : Ingle DJ, Goodale M, Mansfield RJW, editors. *Analysis of visual behaviour*. Cambridge (MA) : MIT Press; 1982, p. 549-86.
12. Hickok G, Poeppel D. The cortical organization of speech processing. *Nat Rev Neurosci* 2007 ; 8 : 393-402.
13. Dehaene S, Le Clec'h G, Poline JB, et al. The visual word form area: a prelexical representation of visual words in the fusiform gyrus. *Neuroreport* 2002 ; 13 : 321-5.
14. Price CJ, Devlin JT. The myth of the visual word form area. *Neuroimage* 2003 ; 19 : 473-81.
15. Binder JR, Medler DA, Westbury CF, et al. Tuning of the human left fusiform gyrus to sublexical orthographic structure. *Neuroimage* 2006 ; 33 : 739-48.
16. Devlin JT, Jamison HL, Gonnerman LM, et al. The role of the posterior fusiform gyrus in reading. *J Cogn Neurosci* 2006 ; 18 : 911-22.
17. Yoncheva YN, Zevin JD, Maurer U, et al. Auditory selective attention to speech modulates activity in the visual word form area. *Cereb Cortex* 2010 ; 20 : 622-32.
18. Jobard G, Crivello F, Tzourio-Mazoyer N. Evaluation of the dual route theory of reading: a metanalysis of 35 neuroimaging studies. *Neuroimage* 2003 ; 20 : 693-712.
19. Binder JR, Desai RH, Graves WW, et al. Where is the semantic system? A critical review and meta-analysis of 120 functional neuroimaging studies. *Cereb Cortex* 2009 ; 19 : 2767-96.
20. Shapiro KA, Moo LR, Caramazza A. Cortical signatures of noun and verb production. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2006 ; 103 : 1644-9.
21. Vigliocco G, Vinson DP, Druks J, et al. Nouns and verbs in the brain: a review of behavioural, electrophysiological, neuropsychological and imaging studies. *Neurosci Biobehav Rev* 2011 ; 35 : 407-26.
22. Pulvermüller F, Fadiga L. Active perception: sensorimotor circuits as a cortical basis for language. *Nat Rev Neurosci* 2010 ; 11 : 351-60.
23. Martin A. The representation of object concepts in the brain. *Annu Rev Psychol* 2007 ; 58 : 25-45.
24. Caplan D, Alpert N, Waters G, et al. Activation of Broca's area by syntactic processing under conditions of concurrent articulation. *Hum Brain Mapp* 2000 ; 9 : 65-71.
25. Dapretto M, Bookheimer SY. Form and content: dissociating syntax and semantics in sentence comprehension. *Neuron* 1999 ; 24 : 427-32.
26. Ni W, Constable RT, Mencl WE, et al. An event-related neuroimaging study distinguishing form and content in sentence processing. *J Cogn Neurosci* 2000 ; 12 : 120-33.
27. Segaert K, Menenti L, Weber K, et al. Shared syntax in language production and language comprehension – An fMRI study. *Cereb Cortex* 2011 ; 22 : 1662-70.
28. Rapp AM, Leube DT, Erb M, et al. Laterality in metaphor processing: lack of evidence from functional magnetic resonance imaging for the right hemisphere theory. *Brain Lang* 2007 ; 100 : 142-9.
29. Bambini V, Gentili C, Ricciardi E, et al. Decomposing metaphor processing at the cognitive and neural level through functional magnetic resonance imaging. *Brain Res Bull* 2011 ; 86 : 203-16.
30. Brown S, Laird AR, Pfordresher PQ, et al. The somatotopy of speech: phonation and articulation in the human motor cortex. *Brain Cogn* 2009 ; 70 : 31-41.
31. Hickok G. The functional neuroanatomy of language. *Phys Life Rev* 2009 ; 6 : 121-43.

32. Beeson P, Rapcsak S, Plante E, *et al.* The neural substrates of writing: a functional magnetic resonance imaging study. *Aphasiology* 2003;17:647-65.
33. Omura K, Tsukamoto T, Kotani Y, *et al.* Neural correlates of phoneme-to-grapheme conversion. *Neuroreport* 2004;15:949-53.
34. Roux FE, Dufor O, Giussani C, *et al.* The graphemic/motor frontal area Exner's area revisited. *Ann Neurol* 2009;66:537-45.
35. Sugihara G, Kaminaga T, Sugishita M. Interindividual uniformity and variety of the "Writing center": a functional MRI study. *Neuroimage* 2006;32:1837-49.
36. Purcell JJ, Napoliello EM, Eden GF. A combined fMRI study of typed spelling and reading. *Neuroimage* 2011;55:750-62.
37. Vigneau M, Beaucois V, Herve PY, *et al.* What is right-hemisphere contribution to phonological, lexico-semantic, and sentence processing? Insights from a meta-analysis. *Neuroimage* 2011;54:577-93.
38. Démonet JF, Thierry G, Cardebat D. Renewal of the neurophysiology of language: functional neuroimaging. *Physiol Rev* 2005;85:49-95.
39. Wildgruber D, Ackermann H, Kreifelts B, *et al.* Cerebral processing of linguistic and emotional prosody: fMRI studies. *Prog Brain Res* 2006;156:249-68.
40. Pascual-Leone A, Walsh V, Rothwell J. Transcranial magnetic stimulation in cognitive neuroscience – virtual lesion, chronometry, and functional connectivity. *Curr Opin Neurobiol* 2000;10:232-7.
41. Andoh J, Artiges E, Pallier C, *et al.* Modulation of language areas with functional MR image-guided magnetic stimulation. *Neuroimage* 2006;29:619-27.
42. Devlin JT, Matthews PM, Rushworth MFS. Semantic processing in the left inferior prefrontal cortex: a combined functional magnetic resonance imaging and transcranial magnetic stimulation study. *J Cogn Neurosci* 2003;15:71-84.
43. Nixon P, Lazarova J, Hodinott-Hill I, *et al.* The inferior frontal gyrus and phonological processing: an investigation using rTMS. *J Cogn Neurosci* 2004;16:289-300.
44. Naeser MA, Martin PI, Treglia E, *et al.* Research with rTMS in the treatment of aphasia. *Restor Neurol Neurosci* 2010;28:511-29.
45. Leff AP, Schofield TM, Stephan KE, *et al.* The cortical dynamics of intelligible speech. *J Neurosci* 2008;28:13209-15.
46. Saur D, Schelter B, Schnell S, *et al.* Combining functional and anatomical connectivity reveals brain networks for auditory language comprehension. *Neuroimage* 2010;49:3187-97.

Annexe 2. Annexes aux expérimentations de psycholinguistique (chapitre V)

Annexe 2.1. Liste des 64 items utilisés dans la première expérimentation en écriture sous dictée

	Position Initiale		Position Finale	
	Réguliers	Irréguliers	Réguliers	Irréguliers
Mots Courts	clan	quai	lion	plomb
	fraise	phase	char	dard
	soif	cerf	pape	grappe
	spectre	sceptre	pulpe	trappe
	sangle	cintre	bru	grue
	aigle	herse	brin	frein
	orge	horde	nièce	liasse
	ruche	rhume	farce	crasse
Mots Longs	frénésie	pharmacie	tapioca	syndicat
	festival	phénomène	escabeau	escargot
	séminaire	certitude	insomnie	appétit
	sépulture	céramique	chirurgie	bistouri
	candidat	quantité	panoplie	pissenlit
	camarade	kangourou	qualité	oreiller
	araignée	harmonie	argument	restaurant
	allusion	hanneton	instrument	ouragan

Annexe 2.2. Caractéristiques des phonèmes identifiés en position initiale et finale sur l'ensemble de la base lors des calculs de consistance phonographique

Phonème	Position initiale			Position finale		
	Nombre de graphies possibles	Nombre d'occurrences ¹	Somme des fréquences ²	Nombre de graphies possibles	Nombre d'occurrences ¹	Somme des fréquences ²
[ã]	7	5708	11710	26	9636	44042
[õ]	5	169	653	17	8874	28294
[(ə)]	-	-	-	2	21	912
[œ]	2	4	25	7	51	987
[ø]	5	94	350	16	751	109482
[ê]	5	4311	7250	28	2505	16794
[u]	1	56	176	-	-	-
[œ]	6	76	1387	-	-	-
[a]	10	11006	39240	16	7334	57367
[wa]	17	108	154	26	557	11103
[b]	1	7131	19252	5	362	1169
[d]	2	11914	97834	5	1999	6378
[dʒ]	3	62	65	-	-	-
[e]	8	5716	20665	18	31578	86342
[ɛ]	12	2954	16190	27	15953	57860
[f]	2	6250	26468	14	1083	1692
[g]	3	3758	8818	8	541	1050
[ŋ]	-	-	-	2	157	68
[gz]	1	16	2	-	-	-
[i]	6	2279	23164	25	5885	43631
[j]	5	150	1113	18	1021	4954
[k]	5	13298	50491	22	3590	12787
[ks]	1	5	1	7	186	330
[l]	1	3283	80638	11	6406	48538
[m]	1	7699	44822	8	2516	14454
[n]	2	2159	21230	12	3982	19029
[ɲ]	2	21	10	3	299	1054
[o]	11	2039	11040	31	2411	10084
[ɔ]	3	992	3352	-	-	-
[p]	1	12249	73661	8	674	1628
[R]	3	12823	26801	20	12753	88310
[s]	5	10492	78388	16	3895	15285
[ʃ]	4	2230	9098	12	946	3557
[t]	2	6724	34421	13	7874	25562
[ts]	-	-	-	2	13	6
[tʃ]	3	45	14	-	-	-
[u]	5	339	1373	34	483	16543
[v]	2	3354	25624	5	975	2712
[w]	5	74	773	2	3	4
[x]	1	2	1	-	-	-
[y]	4	710	11238	16	1820	23880
[z]	1	257	215	9	3436	6414
[ʒ]	3	1921	20538	6	1914	5944

¹Nombre d'occurrences dans la base du phonème considéré à la position considérée.

²Somme des fréquences lexicales des mots comportant le phonème considéré à la position considérée

Annexe 2.3. Valeurs de consistance type et token pour tous les couples phonème-graphème identifiés, en position initiale puis en position finale

Légende : *Phon* : Phonème ; *Graph* : Graphème ; Σ *fréq* : somme des fréquences ; *ConType* :consistance-type ; *ConToken* :consistance-token.

Phonème Initial											
Phon	Graph	N	Σ fréq	ConType	ConToken						
/ã/	en	3279	9199	0,57	0,79	aî	8	39	0,00	0,00	
	em	1369	1430	0,24	0,12	et	2	2	0,00	0,00	
	an	846	787	0,15	0,07	ae	1	0	0,00	0,00	
	am	154	212	0,03	0,02	oe	2	0	0,00	0,00	
	han	52	78	0,01	0,01	e	2578	12357	0,87	0,76	
	ham	7	4	0,00	0,00	ai	165	1695	0,06	0,10	
	hen	1	0	0,00	0,00	ê	7	1561	0,00	0,10	
/õ/	on	94	281	0,56	0,43	a	9	175	0,00	0,01	
	om	53	256	0,31	0,39	he	128	168	0,04	0,01	
	hon	20	116	0,12	0,18	é	43	131	0,01	0,01	
	hom	1	1	0,01	0,00	hai	8	60	0,00	0,00	
/œ/	un	1	0	0,01	0,00	è	4	29	0,00	0,00	
	hum	3	22	0,75	0,89	hê	4	11	0,00	0,00	
	un	1	3	0,25	0,11	hè	3	2	0,00	0,00	
/ø/	heu	9	247	0,10	0,71	aî	3	1	0,00	0,00	
	eu	60	51	0,64	0,15	hay	2	0	0,00	0,00	
/ɛ/	eux	1	48	0,01	0,14	f	5888	25888	0,94	0,98	
	oe	22	4	0,23	0,01	ph	362	580	0,06	0,02	
	e	2	0	0,02	0,00	g	3421	7864	0,91	0,89	
	in	3548	5394	0,82	0,74	gu	333	950	0,09	0,11	
/ɛ̃/	im	750	1383	0,17	0,19	gh	4	4	0,00	0,00	
	ain	2	469	0,00	0,06	/gz/	x	16	2	1,00	1,00
	hin	10	3	0,00	0,00	i	1803	22439	0,79	0,97	
	ein	1	0	0,00	0,00	hi	171	626	0,08	0,03	
/ɥ/	hu	56	176	1,00	1,00	hy	295	98	0,13	0,00	
	heu	35	972	0,46	0,70	y	3	1	0,00	0,00	
/œ/	oe	14	291	0,18	0,21	ea	1	0	0,00	0,00	
	oeu	16	117	0,21	0,08	e	6	0	0,00	0,00	
	hu	5	6	0,07	0,00	y	85	995	0,57	0,89	
	u	5	1	0,07	0,00	hi	25	110	0,17	0,10	
	eu	1	0	0,01	0,00	i	30	5	0,20	0,00	
/a/	a	10201	37547	0,93	0,96	hy	4	3	0,03	0,00	
	ha	641	1090	0,06	0,03	j	6	0	0,04	0,00	
	â	40	459	0,00	0,01	c	12206	32679	0,92	0,65	
	hâ	49	90	0,00	0,00	qu	578	17460	0,04	0,35	
	à	48	48	0,00	0,00	k	313	193	0,02	0,00	
	ou	8	2	0,00	0,00	ch	187	148	0,01	0,00	
	i	6	2	0,00	0,00	kh	14	11	0,00	0,00	
	hi	7	1	0,00	0,00	/ks/	x	5	1	1,00	1,00
	hou	4	0	0,00	0,00	/l/	l	3283	80638	1,00	1,00
	e	2	0	0,00	0,00	/m/	m	7699	44822	1,00	1,00
/b/	b	7131	19252	1,00	1,00	/n/	n	2157	21229	1,00	1,00
	d	11912	97834	1,00	1,00	kn	2	0	0,00	0,00	
/d/	dh	2	0	0,00	0,00	gn	17	9	0,81	0,86	
	j	42	50	0,68	0,77	gni	4	1	0,19	0,14	
/dʒ/	g	11	10	0,18	0,15	au	580	7327	0,28	0,66	
	dj	9	5	0,15	0,08	o	1124	2620	0,55	0,24	
/e/	é	4815	16964	0,84	0,82	ho	237	479	0,12	0,04	
	e	473	2842	0,08	0,14	hau	49	306	0,02	0,03	
	hé	315	448	0,06	0,02	hò	19	248	0,01	0,02	
	ai	100	370	0,02	0,02	ha	2	27	0,00	0,00	
						haut	19	25	0,01	0,00	
					eau	3	5	0,00	0,00		
					oh	2	1	0,00	0,00		
					heau	2	1	0,00	0,00		
					eaux	2	0	0,00	0,00		

	o	846	1705	0,85	0,51
/ɔ/	ho	139	1647	0,14	0,49
	au	7	1	0,01	0,00
/p/	p	12249	73661	1,00	1,00
	r	12743	26751	0,99	1,00
/R/	rh	79	50	0,01	0,00
	kh	1	0	0,00	0,00
	s	9123	60082	0,87	0,77
/s/	c	1209	15543	0,12	0,20
	ç	4	2505	0,00	0,03
	sc	155	258	0,01	0,00
	th	1	0	0,00	0,00
	ch	2065	9047	0,93	0,99
/ʃ/	sh	103	36	0,05	0,00
	sch	59	14	0,03	0,00
	s	3	0	0,00	0,00
/t/	t	6537	34182	0,97	0,99
	th	187	239	0,03	0,01
	tch	28	9	0,62	0,59
/tʃ/	c	2	5	0,04	0,32
	ch	15	1	0,33	0,09
	ou	275	1287	0,81	0,94
/u/	aoû	1	50	0,00	0,04
	hou	59	36	0,17	0,03
	u	2	0	0,01	0,00
	hoo	2	0	0,01	0,00
/v/	v	3324	25584	0,99	1,00
	w	30	39	0,01	0,00
	ou	19	721	0,26	0,93
/w/	wh	9	28	0,12	0,04
	w	32	21	0,43	0,03
	o	13	2	0,18	0,00
	hu	1	1	0,01	0,00
	oi	40	126	0,37	0,82
	oua	23	10	0,21	0,06
	oie	2	5	0,02	0,03
	oies	2	4	0,02	0,03
	wa	24	4	0,22	0,02
	oy	5	1	0,05	0,01
	ouah	1	1	0,01	0,01
	wha	1	1	0,01	0,01
/wa/	hoi	2	0	0,02	0,00
	o	1	0	0,01	0,00
	hoy	1	0	0,01	0,00
	hou	1	0	0,01	0,00
	ois	1	0	0,01	0,00
	wouah	1	0	0,01	0,00
	oit	1	0	0,01	0,00
	whi	1	0	0,01	0,00
	wi	1	0	0,01	0,00
/x/	j	2	1	1,00	1,00
	hu	218	527	0,31	0,05
/y/	eu	14	60	0,02	0,01
	eû	3	6	0,00	0,00
	u	475	10646	0,67	0,95
/z/	z	257	215	1,00	1,00
	j	1120	18244	0,58	0,89
/ʒ/	g	789	2281	0,41	0,11
	ge	12	13	0,01	0,00

Phonème Final					
Phon	Graph	N	Σ fréq	ConType	ConToken
	ant	4765	11857	0,49	0,27
	ent	2522	11206	0,26	0,25
	ans	140	10793	0,01	0,25
	and	37	2220	0,00	0,05
	emps	10	1700	0,00	0,04
	ents	823	1636	0,09	0,04
	ants	941	1210	0,10	0,03
	an	222	588	0,02	0,01
	end	33	537	0,00	0,01
	ens	16	527	0,00	0,01
	ends	35	400	0,00	0,01
	ands	27	338	0,00	0,01
/ä/	anc	18	313	0,00	0,01
	ang	10	256	0,00	0,01
	ancs	10	203	0,00	0,00
	amp	5	139	0,00	0,00
	amps	3	75	0,00	0,00
	angs	6	28	0,00	0,00
	aon	3	5	0,00	0,00
	engs	1	3	0,00	0,00
	eng	1	3	0,00	0,00
	aons	3	2	0,00	0,00
	am	1	2	0,00	0,00
	empt	2	1	0,00	0,00
	en	1	0	0,00	0,00
	ams	1	0	0,00	0,00
	on	2584	18537	0,29	0,66
	ons	5058	5090	0,57	0,18
	ont	1108	2865	0,12	0,10
	ond	37	722	0,00	0,03
	om	9	361	0,00	0,01
	ong	5	326	0,00	0,01
	onds	35	125	0,00	0,00
/5/	oms	4	75	0,00	0,00
	ongs	4	67	0,00	0,00
	onts	9	32	0,00	0,00
	omb	4	31	0,00	0,00
	onc	3	23	0,00	0,00
	oncs	3	23	0,00	0,00
	ompt	4	12	0,00	0,00
	omds	3	3	0,00	0,00
	ompts	1	2	0,00	0,00
	omps	3	2	0,00	0,00
/ə/	e	20	911	0,95	1,00
	es	1	1	0,05	0,00
	un	27	855	0,53	0,87
	uns	15	54	0,29	0,05
	um	1	52	0,02	0,05
/ë/	ums	1	13	0,02	0,01
	unt	3	9	0,06	0,01
	unts	3	4	0,06	0,00
	y	1	0	0,02	0,00
/ø/	e	24	98784	0,03	0,90
	eux	592	6329	0,79	0,06
	eu	83	3030	0,11	0,03
	eut	7	737	0,01	0,01
	eur	2	287	0,00	0,00
	eue	11	128	0,01	0,00
	eus	14	53	0,02	0,00
	eues	4	40	0,01	0,00
	eurs	1	38	0,00	0,00
	oead	1	14	0,00	0,00
	oeux	1	11	0,00	0,00

	oeu	1	11	0,00	0,00				
	euds	1	10	0,00	0,00				
	œufs	2	7	0,00	0,00				
	guh	5	3	0,01	0,00				
	guhs	2	1	0,00	0,00				
/ɛ/	en	573	5007	0,23	0,30				
	in	504	3887	0,20	0,23				
	ain	200	2472	0,08	0,15				
	ins	396	1626	0,16	0,10				
	ains	151	932	0,06	0,06				
	ens	432	875	0,17	0,05				
	int	60	691	0,02	0,04				
	ent	27	548	0,01	0,03				
	ingt	3	156	0,00	0,01				
	eint	30	145	0,01	0,01				
	aint	9	91	0,00	0,01				
	aim	6	84	0,00	0,00				
	ints	24	67	0,01	0,00				
	ing	10	50	0,00	0,00				
	inct	5	37	0,00	0,00				
	eints	26	29	0,01	0,00				
	ings	4	29	0,00	0,00				
	aints	8	26	0,00	0,00				
	înt	21	18	0,01	0,00				
	ingts	1	9	0,00	0,00				
	incts	3	8	0,00	0,00				
	aims	4	3	0,00	0,00				
	ym	1	2	0,00	0,00				
	aings	1	1	0,00	0,00				
eing	3	0	0,00	0,00					
aincs	1	0	0,00	0,00					
aïnc	1	0	0,00	0,00					
aing	1	0	0,00	0,00					
/a/	a	4967	44560	0,68	0,78				
	as	1237	11135	0,17	0,19				
	at	213	869	0,03	0,02				
	ats	132	363	0,02	0,01				
	ât	725	189	0,10	0,00				
	ac	6	73	0,00	0,00				
	ars	1	59	0,00	0,00				
	aps	2	41	0,00	0,00				
	ap	2	35	0,00	0,00				
	ah	26	21	0,00	0,00				
	âts	7	14	0,00	0,00				
	acs	3	4	0,00	0,00				
	az	1	1	0,00	0,00				
	ahs	10	1	0,00	0,00				
	â	1	0	0,00	0,00				
	ad	1	0	0,00	0,00				
	/wa/	ois	221	3941	0,40	0,35			
oi		71	3815	0,13	0,34				
oit		40	1286	0,07	0,12				
oix		12	767	0,02	0,07				
oie		60	387	0,11	0,03				
oid		5	177	0,01	0,02				
oigts		2	176	0,00	0,02				
oits		14	119	0,03	0,01				
oient		43	114	0,08	0,01				
oids		6	102	0,01	0,01				
oigt		1	80	0,00	0,01				
oies		31	52	0,06	0,00				
oua		19	50	0,03	0,00				
oît		9	23	0,02	0,00				
ouah		3	3	0,01	0,00				
wa		1	3	0,00	0,00				
uat		2	2	0,00	0,00				
uât		6	1	0,01	0,00				
uats		2	1	0,00	0,00				
	oye	1	1	0,00	0,00				
	oy	1	0	0,00	0,00				
	ouas	2	0	0,00	0,00				
	oïts	2	0	0,00	0,00				
	hua	1	0	0,00	0,00				
	huas	1	0	0,00	0,00				
	oïs	1	0	0,00	0,00				
/b/	be	156	675	0,43	0,58				
	bes	98	402	0,27	0,34				
	b	55	55	0,15	0,05				
	bent	28	27	0,08	0,02				
/d/	bs	25	10	0,07	0,01				
	de	1047	4883	0,52	0,77				
	des	666	1174	0,33	0,18				
	dent	154	200	0,08	0,03				
/e/	d	100	111	0,05	0,02				
	ds	32	10	0,02	0,00				
	és	4994	36278	0,16	0,42				
	er	5438	18751	0,17	0,22				
	é	7217	17102	0,23	0,20				
	ée	5105	6159	0,16	0,07				
	ez	4281	3926	0,14	0,05				
	ées	3893	2282	0,12	0,03				
	ers	589	1244	0,02	0,01				
	ed	24	275	0,00	0,00				
	eds	13	251	0,00	0,00				
	ef	2	36	0,00	0,00				
	ais	2	23	0,00	0,00				
	efs	3	10	0,00	0,00				
	éent	7	3	0,00	0,00				
	e	5	1	0,00	0,00				
	ay	1	0	0,00	0,00				
	ey	1	0	0,00	0,00				
	eh	2	0	0,00	0,00				
	aes	1	0	0,00	0,00				
/ɛ/	ait	5549	30425	0,35	0,53				
	ais	3236	12961	0,20	0,22				
	aient	3851	5960	0,24	0,10				
	ès	28	3111	0,00	0,05				
	et	410	1832	0,03	0,03				
	ai	2318	1814	0,15	0,03				
	ets	309	782	0,02	0,01				
	aie	62	245	0,00	0,00				
	êt	16	192	0,00	0,00				
	aïts	45	170	0,00	0,00				
	aix	4	106	0,00	0,00				
	ect	9	90	0,00	0,00				
	êts	14	62	0,00	0,00				
	aies	44	53	0,00	0,00				
	ey	16	15	0,00	0,00				
	aid	2	12	0,00	0,00				
	ects	5	12	0,00	0,00				
	ay	15	8	0,00	0,00				
	aids	2	4	0,00	0,00				
eys	8	2	0,00	0,00					
ays	4	2	0,00	0,00					
eis	1	0	0,00	0,00					
ei	1	0	0,00	0,00					
eah	1	0	0,00	0,00					
ez	1	0	0,00	0,00					
è	1	0	0,00	0,00					
egs	1	0	0,00	0,00					
/f/	f	490	1053	0,45	0,62				
	fs	307	294	0,28	0,17				
	ffe	49	113	0,05	0,07				
	phe	79	111	0,07	0,07				
	ffes	28	41	0,03	0,02				
phes	49	38	0,05	0,02					

	fe	26	19	0,02	0,01		k	85	34	0,02	0,00
	ffent	18	7	0,02	0,00		ks	36	13	0,01	0,00
	ff	16	6	0,01	0,00		cks	30	13	0,01	0,00
	fes	13	6	0,01	0,00		cque	5	12	0,00	0,00
	ph	3	2	0,00	0,00		cques	5	9	0,00	0,00
	phent	2	1	0,00	0,00		ke	12	8	0,00	0,00
	fent	2	0	0,00	0,00		ch	11	5	0,00	0,00
	gh	1	0	0,00	0,00		qs	1	3	0,00	0,00
	gue	255	692	0,47	0,66		qu	5	3	0,00	0,00
	gues	157	298	0,29	0,28		chs	5	2	0,00	0,00
	g	65	25	0,12	0,02		khs	2	1	0,00	0,00
/g/	c	1	16	0,00	0,02		kes	6	0	0,00	0,00
	gs	30	9	0,06	0,01		kh	5	0	0,00	0,00
	guent	30	9	0,06	0,01		ckent	1	0	0,00	0,00
	cs	1	1	0,00	0,00		g	1	0	0,00	0,00
	gh	2	0	0,00	0,00		l	1165	21187	0,18	0,44
/ŋ/	ng	119	58	0,76	0,86		lle	494	10341	0,08	0,21
	ngs	38	9	0,24	0,14		le	2193	8965	0,34	0,18
	i	933	21599	0,16	0,50		ls	360	3474	0,06	0,07
	it	590	8664	0,10	0,20		les	1537	2630	0,24	0,05
	is	960	6834	0,16	0,16		lles	349	1611	0,05	0,03
	ie	1882	4285	0,32	0,10		lent	234	247	0,04	0,01
	ies	927	739	0,16	0,02		ll	37	50	0,01	0,00
	its	128	681	0,02	0,02		llent	34	33	0,01	0,00
	ys	15	244	0,00	0,01		hl	2	0	0,00	0,00
	ix	6	117	0,00	0,00		lh	1	0	0,00	0,00
	il	10	105	0,00	0,00		me	1106	5931	0,44	0,41
	ils	7	85	0,00	0,00		mme	85	5620	0,03	0,39
	y	91	78	0,02	0,00		mes	774	1306	0,31	0,09
	ît	153	76	0,03	0,00		mmes	51	1196	0,02	0,08
/i/	ient	135	61	0,02	0,00		m	316	255	0,13	0,02
	iz	1	18	0,00	0,00		ment	88	93	0,03	0,01
	id	3	15	0,00	0,00		ms	84	48	0,03	0,00
	ïe	5	10	0,00	0,00		mment	12	4	0,00	0,00
	ids	2	4	0,00	0,00		gne	143	766	0,48	0,73
	ye	3	4	0,00	0,00	/r/	gnes	96	235	0,32	0,22
	ïes	3	3	0,00	0,00		gnent	60	52	0,20	0,05
	ï	5	3	0,00	0,00		ne	1449	14965	0,36	0,79
	ïs	5	2	0,00	0,00		nne	793	1745	0,20	0,09
	ee	12	1	0,00	0,00		nes	828	1428	0,21	0,08
	ees	4	1	0,00	0,00		nnes	382	357	0,10	0,02
	yes	3	1	0,00	0,00		nment	147	263	0,04	0,01
	ït	2	0	0,00	0,00		n	177	104	0,04	0,01
	ille	419	2163	0,41	0,44		nent	144	96	0,04	0,01
	il	85	1603	0,08	0,32		mne	5	49	0,00	0,00
	illes	260	846	0,25	0,17		ns	53	20	0,01	0,00
	ils	41	193	0,04	0,04		mment	2	1	0,00	0,00
	illent	119	65	0,12	0,01		nns	1	1	0,00	0,00
	ye	34	39	0,03	0,01		lne	1	0	0,00	0,00
	y	14	13	0,01	0,00		eau	217	2055	0,09	0,20
	ïe	3	9	0,00	0,00		os	327	1677	0,14	0,17
/j/	aï	8	9	0,01	0,00		ôt	14	870	0,01	0,09
	yent	13	5	0,01	0,00		o	694	860	0,29	0,09
	ei	2	3	0,00	0,00		aut	20	859	0,01	0,09
	yes	13	3	0,01	0,00		op	4	811	0,00	0,08
	ys	3	2	0,00	0,00		eaux	181	771	0,08	0,08
	oï	2	0	0,00	0,00		ot	224	700	0,09	0,07
	ies	1	0	0,00	0,00		aux	377	563	0,16	0,06
	yies	1	0	0,00	0,00		ots	171	534	0,07	0,05
	aïs	2	0	0,00	0,00		aud	48	181	0,02	0,02
	ai	1	0	0,00	0,00		au	31	47	0,01	0,00
	c	203	5339	0,06	0,42		auds	41	43	0,02	0,00
	que	1822	4977	0,51	0,39		auts	10	30	0,00	0,00
/k/	ques	1094	1679	0,30	0,13		ow	5	17	0,00	0,00
	q	14	292	0,00	0,02		ôts	6	15	0,00	0,00
	cs	103	292	0,03	0,02		ô	3	14	0,00	0,00
	quent	85	61	0,02	0,00		oc	7	11	0,00	0,00
	ck	59	44	0,02	0,00		ocs	5	10	0,00	0,00

ût	41	257	0,02	0,01
û	5	253	0,00	0,01
ul	18	68	0,01	0,00
uent	52	40	0,03	0,00
uts	15	26	0,01	0,00
uë	8	19	0,00	0,00
ux	4	13	0,00	0,00
uës	6	6	0,00	0,00
uls	2	4	0,00	0,00
ûts	2	4	0,00	0,00
uth	1	0	0,00	0,00
se	1959	4410	0,57	0,69
ses	1126	1442	0,33	0,22
ze	60	317	0,02	0,05
sent	214	180	0,06	0,03

z	16	34	0,00	0,01
zes	28	11	0,01	0,00
s	24	11	0,01	0,00
zz	5	9	0,00	0,00
zent	4	0	0,00	0,00
ge	1207	4638	0,63	0,78
ges	591	1223	0,31	0,21
gent	110	83	0,06	0,01
j	4	1	0,00	0,00
je	1	0	0,00	0,00
jes	1	0	0,00	0,00

Annexe 2.4. Liste des 180 items utilisés dans la seconde expérimentation en écriture sous dictée

		1 syllabe	2 syllabes	3 syllabes
Initiale Consistante	Finale Consistante	acte	tomate	diplomate
		fuite	chaloupe	marchandise
		digue	falaise	tentative
		morgue	valise	perspective
		glaise	devise	patriarche
		fraise	malaise	altitude
		buse	pelouse	attitude
		prose	brioche	limonade
		rive	peluche	multitude
		arche	montagne	propagande
		roche	lavande	reportage
		vigne	moutarde	aspirine
		bagne	rivage	discipline
		grade	vertige	magazine
		marge	potage	mandarine
	Finale Inconsistante	nerf	faubourg	labyrinthe
		drap	mammouth	bungalow
		tronc	landau	chocolat
		plomb	foulard	boulevard
		tank	billard	tabouret
		daim	brancard	chapelet
		pneu	poignard	perroquet
		gland	plafond	pistolet
		nymphé	banquet	paquebot
		grappe	revers	manuscrit
		moins	velours	aquarelle
		trueie	recette	traversin
		tiers	navette	locataire
		grain	marquis	miniature
		biais	doyen	partenaire
Initiale Inconsistante	Finale Consistante	kyste	oreille	rhumatisme
		ouate	oseille	hypocrite
		quinte	rhubarbe	anthracite
		herbe	quignon	omoplate
		gerbe	hantise	effectif
		oeuf	emphase	hanneton
		phase	cerise	cellulose
		aise	olive	offensive
		guise	offrande	chrysalide
		quiche	phalange	habitude
		hargne	hommage	certitude
		guigne	cirage	hortensia
		horde	horloge	œsophage
		ange	haleine	guillotiné
		cierge	cyclone	officine
	Finale Inconsistante	hall	hareng	photographe
		quai	essaim	quiproquo
		herse	homard	pharmacie
		anse	guichet	harmonie
		houppe	œillet	euphorie
		christ	hublot	hibiscus
		short	circuit	omelette
		hotte	gibier	oreiller
		cible	cellier	citoyen
		housse	quartier	quotidien
		sceptre	harnais	antiquaire
		sciure	ciment	orateur
		ambre	quotient	gymnastique
		gendre	cercueil	cicatrice
		œuvre	effroi	circonstance

Annexe 3. Liste des études et des contrastes inclus dans la méta-analyse sur l'écriture en neuroimagerie (chapitre VI)

Reference	Language	Subjects	Imaging technique	Writing Method	Contrasts			
					Experimental task	Baseline / Control Task	Motor Output Control	Linguistic / Input Control
Petrides et al. (1995)	English	11	PET	Pen and paper, without vision	Writing to dictation of words	Oral recall of words		•
Seitz et al. (1997)	English	8	PET	Digitizing tablet, vision with video camera	Fast repetitive writing of a single letter	Passive vision		•
					Precise repetitive writing of a single letter	Passive vision		•
Tokunaga et al. (1999)	Japanese	8	PET	Mental writing (no movement)	Mental writing to dictation of words in Kana	Passive listening	•	•
					Mental writing to dictation of words in Kanji	Passive listening	•	•
					<i>Conjunction of both</i>		•	•
Nakamura et al. (2000)	Japanese	10	fMRI	Finger on plastic board	Transcription Kana to Kanji	Perceptive decision task		•
					Transcription Kana to Kanji	Semantic Judgement task		•
					Transcription Kana to Kanji	Oral reading of Kana words		•
Katanoda et al. (2001)	Japanese	17	fMRI	Finger in the air	Written naming in Kana	Visually cued finger tapping	•	
					Written naming in Kana	Silent naming of pictures		•
Nakamura et al. (2002)	Japanese	9	fMRI	Pen on plastic board	Writing to dictation in Kana	Rest		
					Writing to dictation in Kanji	Rest		
Siebner et al. (2002)	German	11	PET	Digitizing tablet, without vision	Repetitive writing of a single word	Rest (holding the pen)		
Beeson et al. (2003)	English	12	fMRI	Pen and paper, without vision	Generative writing of words	Drawing circles	•	
					Generative writing of words	Subvocal generative naming		•
					Generative writing of words	Writing alphabet	•	
Omura et al. (2004)	Japanese	15	fMRI	Finger in the air	Writing to dictation of phonograms	Writing to dictation of symbols	•	•

(Suite page suivante)

(Suite de la table)

Reference	Language	Subjects	Imaging technique	Writing Method	Contrasts			
					Experimental task	Baseline / Control Task	Motor Output Control	Linguistic / Input Control
Rektor et al. (2006)	Czech	10	fMRI	Digitizing tablet, without vision	Write the letters of the alphabet	Rest		•
					Written naming in Kana with right hand	Silent naming of pictures		•
Sugihara et al. (2006)	Japanese	20	fMRI	Finger in the air	Written naming in Kana with left hand	Silent naming of pictures		•
					<i>Conjunction of both</i>		•	•
Harrington et al. (2007)	English	11	fMRI	Mental writing (no movement)	Imagined written naming of a picture	Rest	•	
					Writing to dictation of words	Rest		
Roux et al. (2009) (unpublished data tables)	French	12	fMRI	Pen and paper, without vision	Writing to dictation of words	Tracing circles	•	
					Writing to dictation of words	Oral repetition of words		•
					Writing to dictation of words (masked by tracing circles)	Repetition of words (masked by repetition of syllables)	•	•
Brownsett & Wise (2010)	English	13	PET	Pen and paper, with vision	Production of written narratives	Production of spoken narratives		•
Purcell et al. (2011)	English	17	fMRI	Typewriting on computer keyboard	Typewriting to dictation of words	Typewriting of a meaningless sequence of letters	•	
Rapp & Dufor (2011)	English	8	fMRI	Pen and paper, without vision	Repetitive writing to dictation	Drawing circles and ignore heard word	•	•
Shah et al. (2011)	German	28	fMRI	Pen and paper, without vision	Copying a text	Rest		
					Creative writing (compose stories)	Rest		
					Subvocal and written naming	Subvocal naming and loops tracing	•	•
Segal & Petrides (2012)	English	9	fMRI	Pen and paper, without vision	Word (reading and) copying	Word reading and loops tracing	•	•
					Word (reading and) copying	Nonsense word copying	•	

Annexe 4. Annexes à la première expérimentation en IRMf (chapitre VII)

Annexe 4.1. Liste des 72 items utilisés dans les tâches d'écriture sous dictée et de répétition orale de la première expérimentation IRMf

Mots			
Courts		Longs	
acier	outil	adversaire	inspecteur
agneau	profil	allumette	instrument
album	projet	architecte	intervalle
argot	pudeur	armistice	lampadaire
avril	radio	ascenseur	manivelle
bijou	rayon	autoroute	nostalgie
budget	repos	bicyclette	nourriture
butin	ruban	champignon	partenaire
doyen	savon	compliment	porcelaine
fourmi	soldat	condition	professeur
furie	studio	conviction	propagande
genou	tribu	couverture	prospectus
index	tuyau	discipline	sacrifice
loyer	vapeur	discussion	sensation
miroir	venin	entretien	sympathie
niveau	vertu	fantaisie	territoire
notion	volcan	forteresse	tourbillon
noyau	wagon	industrie	tradition

Annexe 4.2. Tables statistiques des résultats de l'expérimentation

IRMf 1

Résultats du contraste « Ecriture sous dictée > Répétition orale » ($p < .05$, FWE corr., $k > 20$)

Localisation		Taille de cluster	Valeur T	Z-score	Coordonnées MNI		
					x	y	z
Gauche	Gyrus postcentral (BA 3)	1653	15,00	Inf	-39	-21	54
	Gyrus précentral		14,74	Inf	-30	-27	57
	Gyrus frontal moyen		14,38	Inf	-27	-9	63
Droit	Cervelet antérieur (culmen)	348	13,02	Inf	24	-48	-27
	Cervelet postérieur (vermis)		10,06	Inf	3	-63	-24
	Cervelet postérieur (vermis)		9,99	Inf	6	-57	-15
Droit	Gyrus frontal moyen	87	7,56	6,64	27	-9	57
Droit	Lobule pariétal inférieur	75	5,99	5,48	42	-42	54
	Gyrus supramarginal		5,80	5,33	36	-36	39

Résultats du contraste « Ecriture sous dictée > Traçage de créneaux » ($p < .001$, unc., $k > 20$)

Localisation		Taille de cluster	Valeur T	Z-score	Coordonnées MNI		
					x	y	z
Bilatéral	Cervelet postérieur (vermis)	1128	8,84	7,48	6	-63	-27
	Cervelet antérieur (culmen)		8,58	7,32	21	-54	-24
	Cervelet postérieur (declive)		7,06	6,28	24	-66	-27
Gauche	Gyrus postcentral (BA 3)	589	7,30	6,45	-39	-21	54
	Gyrus précentral (BA 4)		5,72	5,27	-36	-27	66
	Lobule pariétal supérieur		4,61	4,35	-21	-66	42
Bilatéral	Aire motrice supplémentaire	622	6,37	5,77	-3	9	54
	Gyrus cingulaire		6,21	5,65	-6	18	39
Gauche	Gyrus fusiforme (BA 37)	51	4,58	4,33	-48	-60	-18
Gauche	Gyrus frontal inférieur (BA 9)	33	4,37	4,15	-51	3	36
Gauche	Pars opercularis	21	4,19	3,99	-45	6	18
Droit	Cuneus	62	4,01	3,83	15	-75	6
	Gyrus lingual		3,81	3,66	0	-87	-3
Droit	Gyrus précentral	26	3,94	3,77	30	-18	57

Résultats de l'analyse de conjonction entre les contrastes « Ecriture sous dictée > Traçage de créneaux » et « Répétition de mots vs. Répétition de syllabes » ($p < .005$, unc., $k > 20$).

Localisation		Taille de cluster	Valeur T	Z-score	Coordonnées MNI		
					x	y	z
Droit	Gyrus temporal moyen (BA 21)	23	3,41	3,30	63	-6	-6
	Gyrus temporal moyen (BA 21)		2,94	2,86	60	3	-9
Gauche	Pars opercularis	20	3,26	3,16	-45	9	21
Bilatéral	Aire motrice supplémentaire	20	3,24	3,14	3	9	60

Résultats du contraste « Ecriture sous dictée > Traçage de créneaux » masqué par le contraste « Répétition de mots vs. Répétition de syllabes » ($p < .001$, unc., $k > 20$).

Localisation		Taille de cluster	Valeur T	Z-score	Coordonnées MNI		
					x	y	z
Droit	Cervelet postérieur (vermis)	1128	8,84	7,48	6	-63	-27
	Cervelet antérieur (culmen)		8,58	7,32	21	-54	-24
	Cervelet postérieur (declive)		7,06	6,28	24	-66	-27
Gauche	Gyrus postcentral (BA 3)	589	7,30	6,45	-39	-21	54
	Gyrus précentral (BA 4)		5,72	5,27	-36	-27	66
	Lobule pariétal supérieur		4,61	4,35	-21	-66	42
Bilatéral	Aire motrice supplémentaire	621	6,37	5,77	-3	9	54
	Gyrus cingulaire		6,21	5,65	-6	18	39
Gauche	Gyrus fusioforme (BA 37)	51	4,58	4,33	-48	-60	-18
Gauche	Gyrus frontal inférieur (BA 9)	33	4,37	4,15	-51	3	36
Droit	Cuneus	62	4,01	3,83	15	-75	6
	Gyrus lingual		3,81	3,66	0	-87	-3
Bilatéral	Gyrus précentral	26	3,94	3,77	30	-18	57

Annexe 5. Expérimentation complémentaire : Détermination de la latéralisation fonctionnelle du langage en IRMf

Cette expérimentation secondaire avait pour objectif d'évaluer la latéralité fonctionnelle du langage chez chaque participant. Le projet de recherche initial prévoyant de recruter un groupe de participants gauchers en complément du groupe de participants droitiers. Cette expérimentation consistait en une tâche additionnelle à l'expérimentation IRMf 1. Les mêmes 16 participants y ont donc participé selon le même dispositif.

Matériel et Méthode

Une tâche de « Génération de verbes » était donc proposée aux 16 participants sous la forme d'un run indépendant pendant la même session d'IRM fonctionnelle. Dans cette tâche, un nom commun était présenté visuellement au centre de l'écran (i.e. mot écrit) et les participants avaient pour instruction de prononcer oralement un ou plusieurs verbes sémantiquement reliés (i.e. de manière continue pendant une durée de 5 secondes par stimulus). 8 blocs de 36 secondes étaient présentés en alternance avec des blocs de repos de 24 secondes. Différentes listes de passation des items, ordonnées de manière pseudo-aléatoire étaient proposées aux différents participants.

48 noms communs fréquents (cf. liste ci-après) étaient utilisés pour cette tâche de génération de verbes (6,3 lettres en moyenne, fréquence moyenne de 39,4), sélectionnés pour être susceptibles d'être associés à un nombre suffisant de verbes différents (en se basant sur les résultats d'une précédente étude locale : $9,3 \pm 2,8$ réponses possibles).

Liste des 48 items utilisés dans la tâche de génération de verbes en IRMf

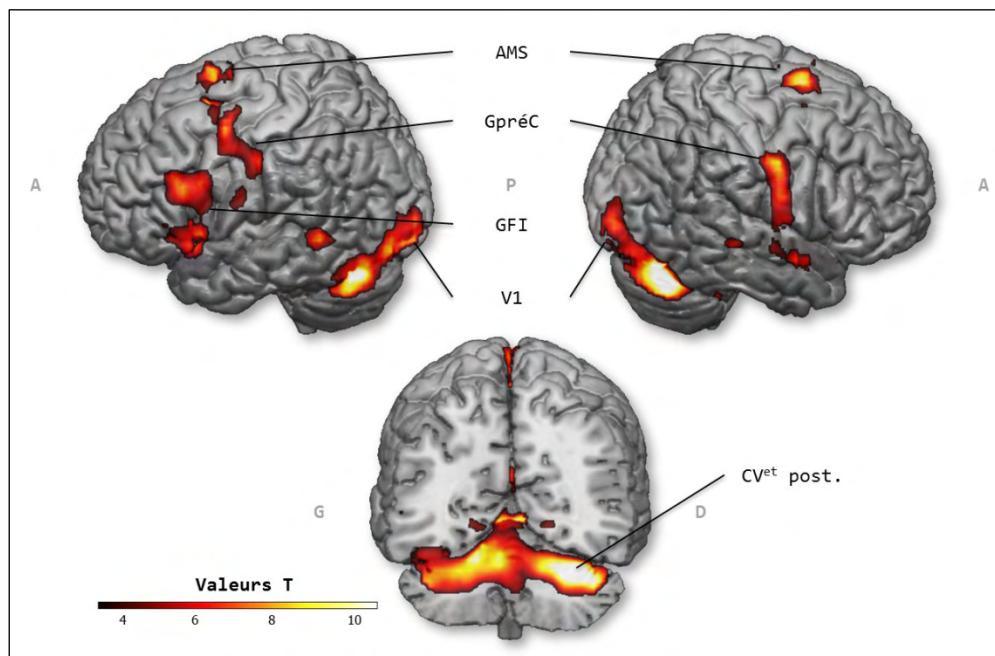
Mots			
ampoule	champignon	lune	sapin
argent	chantier	maison	sport
avion	client	noyau	statue
ballon	coffre	oignon	tableau
banquier	coton	papier	terrain
bateau	croisière	plage	terrier
bijou	dent	pomme	tiroir
brouette	dossier	pont	tourisme
caillou	enveloppe	racine	trésor
camion	facteur	rosier	valise
carreau	flocon	salade	vélo
casserole	insecte	salaire	vitesse

Les paramètres de l'acquisition d'IRM fonctionnelle, ainsi que les prétraitements réalisés sur les volumes acquis lors de ce run, étaient les mêmes que pour le reste de la session.

Le contraste de neuroimagerie « Génération de verbes > Repos » a été calculé chez chaque participant, au premier niveau. Les 16 contrastes ainsi obtenus étaient ensuite inclus au second niveau dans une analyse de groupe à effets aléatoires (one-sample T-test).

Résultats

Le contraste comparant l'activité BOLD durant la tâche de génération orale de verbes à la tâche de repos ($p < .001$ sans correction ; $k > 20$) a révélé des activations bilatérales dans le cervelet postérieur et antérieur, le lobe occipital (gyrus lingual, fusiforme, cortex visuel primaire), l'aire motrice supplémentaire (bilatérale), le gyrus précentral bilatéral (BA6) et le gyrus frontal inférieur gauche (principalement pars triangularis et opercularis) (cf. figure ci-après).

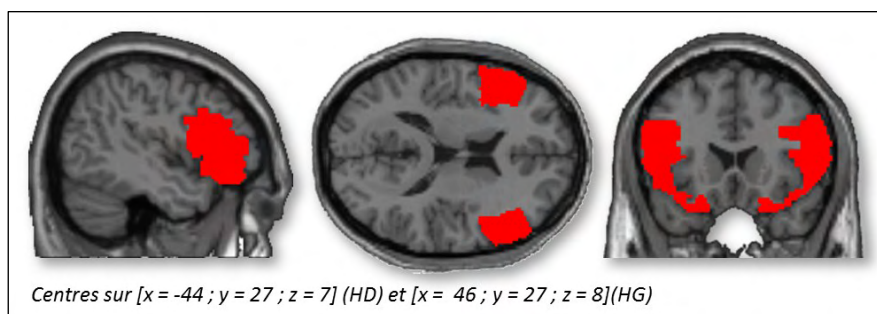


Activations révélées par le contraste « Génération de verbes > Repos » ($p < .001$ unc., $k > 20$). AMS, aire motrice supplémentaire ; GpréC, gyrus précentral ; GFI, gyrus frontal inférieur ; V1, aire visuelle primaire ; CV^{et} post, cervelet postérieur.

Nous pouvons constater que la latéralisation à l'hémisphère gauche dans cette tâche était surtout visible dans le gyrus frontal inférieur (\approx aire de Broca). Afin de déterminer le degré de latéralité fonctionnelle du langage chez chaque participant, nous avons donc quantifié le nombre de voxels actifs dans le gyrus frontal inférieur dans ce contraste, au niveau individuel. Pour ce faire, une région d'intérêt (ou ROI) incluant les gyri frontaux inférieurs gauche et droit a été construite via la toolbox Marsbar v0.43 pour SPM (en utilisant l'atlas AAL, voir figure ci-après), et utilisée comme masque inclusif sur les contrastes individuels « Génération de verbes > Repos » (au seuil de $p < .001$ sans correction). Un ratio de latéralité était ensuite calculé selon la simple formule suivante :

$$\frac{VoxHG - VoxHD}{VoxHG + VoxHD}$$

où VoxHG est simplement le nombre de voxels au-delà du seuil et situés dans l'hémisphère gauche et VoxHD ceux situés dans l'hémisphère droit.



Région d'intérêt utilisée pour déterminer la latéralité fonctionnelle du langage (gyrus frontaux inférieurs gauche et droit)

L'observation des écart-types de ces mesures individuelles révèle une certaine disparité entre les sujets ; le ratio de latéralité moyen était de +0,78 (valeur positive signalant une latéralisation à l'hémisphère gauche) (cf. table ci-après), 14 sujets sur 16 présentaient un ratio supérieur à +0,80, mais deux sujets avaient un ratio négatif : sujet 6 (-0,01) et sujet 7 (-0,49).

Ce ratio n'était pas significativement corrélé avec le score d'Edinburgh ($r = -0,17 ; p = .53$). En excluant les deux sujets atypiques, une tendance apparaissait néanmoins ($r = 0,50 ; p = .07$).

Nombre moyen (et écart-type) de voxels activés dans les gyrus frontaux supérieurs gauche et droit, et ratio de latéralité Gauche-Droite. **Contraste « Génération de verbes > Repos » à $p < .001$ (unc.)**.

	VoxHG	VoxHD	Ratio G-D
Moyenne	465	58	0,78
Écart-type	340	138	0,42



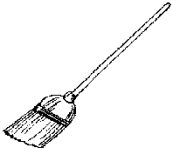















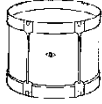


Conclusion

Le réseau cérébral mis en évidence par cette tâche de génération de verbes, bien que, comme nous le prévoyions, latéralisé à gauche chez nos participants droitiers, comportait certaines activations bilatérales : du cortex prémoteur et du cervelet. Tout comme l'activation de l'aire motrice supplémentaire, cela suggère que certaines de ces activations reflétaient le caractère articulaire oral de la tâche.

Les analyses au niveau individuel ont montré que la latéralisation fonctionnelle du langage, lorsque l'on se concentre sur le gyrus frontal inférieur, était distinctement à gauche pour l'essentiel de nos participants : le nombre de voxels activés dans le gyrus frontal inférieur lors de la tâche de génération de verbe était bien supérieur dans l'hémisphère gauche par rapport à l'hémisphère droit. Seuls deux participants contrevenaient à cette règle mais il s'agissait dans un premier cas d'un nombre de voxels significatifs trop faible (au total 99 voxels significatifs sur l'ensemble des deux ROI) ou dans un second cas trop important (au total 1116 voxels significatifs sur l'ensemble des deux ROI). Nous estimons donc que, bien que l'on ne puisse écarter l'hypothèse d'une absence de latéralisation du langage (ou d'une latéralisation à droite), ce résultat s'explique en partie par un seuil statistique qui n'était pas adapté aux activations obtenus chez ces deux participants.

Annexe 6. Annexes à la seconde expérimentation en IRMf (chapitre VIII)

Annexe 6.1. Listes d'items à produire (noms des images) et exemples de stimuli (images) utilisés en IRMf lors des tâches de dénomination écrite et d'épellation orale (âge d'acquisition précoce et tardif »), et lors de la tâche de dessin.

Âge d'acquisition précoce	Âge d'acquisition tardif	Dessin			
abeille	aigle	ancre			
avion	ampoule	bague			
banc	balance	balai			
botte	baleine	ballon			
brosse	bureau	ballon_2			
camion	cage	banane			
canard	canon	bouton			
carotte	cerveau	bras			
chat	cigare	cerise			
chemise	cloche	cintre			
cheval	crabe	ciseau			
clown	cravate	citron			
corde	dauphin	clef			
crayon	flipper	clou			
fraise	gland	coeur			
gant	gorille	couteau			
girafe	guitare	drapeau			
lapin	hache	igloo			
lion	hamac	jambe			
loup	harpe	jupe			
mouche	marteau	lampe			
oiseau	montre	louche			
panier	moto	moufle			
peigne	moulin	nuage			
piano	noeud	orange			
poisson	palmier	ped			
poule	pinceau	pipe			
raisin	plume	poire			
renard	prise	pomme			
roue	raie	pouce			
singe	selle	robe			
souris	serpent	soleil			
tambour	tableau	tasse			
tortue	tigre	tomate			
vache	valise	verre			

Annexe 6.2. Tables statistiques des résultats de l'expérimentation IRMf 2

Résultats du contraste « Dénomination écrite > Dessin » (p <.05, FWE corr., k >20)

Localisation		Taille de cluster	Valeur T	Z-score	Coordonnées MNI		
					x	y	z
Bilatéral	Cuneus (BA 19)	436	8,48	7,25	3	-81	36
	Cuneus (BA 19)		7,81	6,80	-3	-87	33
	Precuneus		7,45	6,56	0	-66	33
Droit	Gyrus temporal moyen (BA 21)	58	7,43	6,54	66	-24	-3
Gauche	Gyrus temporal moyen (BA 21)	196	6,68	6,00	-63	-18	-9
	Gyrus temporal moyen		6,58	5,93	-57	-39	3
	Gyrus temporal supérieur (BA 22)		6,04	5,52	-63	-48	18
Droit	Gyrus angulaire	27	6,16	5,61	54	-66	36
	Gyrus angulaire		5,44	5,05	48	-66	45
Droit	Gyrus lingual	109	6,10	5,57	18	-90	-6
	Cervelet postérieur		5,55	5,14	21	-81	-18
	Cuneus (BA 18)		5,41	5,02	21	-99	6
Gauche	Gyrus angulaire	99	5,99	5,48	-45	-57	27
	Gyrus angulaire		5,96	5,46	-39	-72	45
	Gyrus angulaire		5,47	5,07	-45	-66	39

Résultats du contraste « Dessin > Dénomination écrite » (p <.05, FWE corr., k >20)

Localisation		Taille de cluster	Valeur T	Z-score	Coordonnées MNI		
					x	y	z
Droit	Gyrus temporal inférieur / occipital moyen (BA 19)	263	15,21	Inf	51	-60	-9
Droit	Lobule pariétal inférieur (BA 40)	3581	14,43	Inf	42	-36	48
	Lobule pariétal supérieur (BA 7)		14,30	Inf	21	-69	48
	Gyrus supramarginal		14,15	Inf	36	-36	42
Droit	Gyrus frontal supérieur	280	11,78	Inf	33	-3	60
Gauche	Gyrus frontal moyen (BA 6)	185	9,00	7,58	-24	3	60
Droit	Gyrus frontal inférieur (pars opercularis)	136	7,79	6,79	54	9	30
	Gyrus frontal inférieur (pars opercularis)		7,58	6,65	51	6	21
Gauche	Cervelet antérieur (culmen)	116	7,33	6,47	-39	-45	-36
	Cervelet postérieur		6,60	5,95	-33	-48	-45
	Cervelet postérieur (declive)		6,56	5,91	-27	-69	-24
Droit	Cervelet postérieur	23	6,13	5,59	36	-48	-39

Résultats de l'analyse de conjonction « Dénomination cécrite & Epellation orale » ($p < .05$, FWE corr., $k > 20$), avant et après l'application du masque exclusif « Dessin »

Localisation		Taille de cluster	Valeur T	Z - score	Coordonnées MNI		
					x	y	z
Droit	Cervelet postérieur (declive)	634	11,58	Inf	36	-63	-24
	Gyrus occipital moyen (BA 18)		8,44	7,23	30	-93	9
	Gyrus occipital inférieur		7,33	6,47	42	-81	-6
Gauche	Cervelet postérieur (declive)	209	10,79	Inf	-30	-63	-21
	Gyrus temporal inférieur		5,76	5,30	-51	-57	-18
Gauche	Gyrus occipital moyen (BA 18)	160	8,88	7,50	-27	-96	3
	Gyrus occipital inférieur		5,73	5,28	-39	-81	-6
Bilatéral	Aire motrice supplémentaire (BA 6)	121	8,81	7,46	-3	3	60
Gauche	Gyrus précentral (BA 4)	197	8,17	7,04	-48	-9	54
	Gyrus postcentral		7,76	6,77	-54	-3	39
	Gyrus postcentral		7,56	6,63	-51	-15	42

Localisation		Taille de cluster	Valeur T	Z - score	Coordonnées MNI		
					x	y	z
Gauche	Gyrus postcentral/précentral	27	7,25	6,42	-51	-12	45
Droit	Cuneus (BA 17/18)	34	6,35	5,76	18	-102	6

Résultats de la comparaison « âge d'acquisition précoce vs. âge d'acquisition tardif » indépendamment de tâche (écriture et épellation) ($p < .001$, unc., $k > 20$)

Localisation		Taille de cluster	Valeur de T	Z - score	Coordonnées MNI		
					x	y	z
Droit	Gyrus précentral	48	3,97	3,80	27	-27	54
	Gyrus postcentral		3,78	3,63	39	-21	54
	Gyrus postcentral		3,39	3,28	48	-21	54

Résultats de la comparaison « âge d'acquisition précoce vs. âge d'acquisition tardif » en
dénomination écrite (p <.001, unc., k >20)

Localisation		Taille de cluster	Valeur de T	Z - score	Coordonnées MNI		
					x	y	z
Bilatéral	Gyrus orbitaire médial	30	3,81	3,66	0	57	-6
	Gyrus orbitaire médial		3,67	3,53	-12	57	-3
Bilatéral	Précuneus	56	3,61	3,48	-6	-69	33
	Cortex cingulaire postérieur		3,52	3,40	3	-54	21
	Précuneus		3,43	3,32	0	-66	21
	Cuneus		22	3,58	3,46	9	-81

Résultats de la comparaison « âge d'acquisition précoce vs. âge d'acquisition tardif » en
épellation orale (p <.001, unc., k >20)

Localisation		Taille de cluster	Valeur de T	Z - score	Coordonnées MNI		
					x	y	z
Gauche	Gyrus orbitaire médial	37	4,62	4,36	-12	57	-6
Gauche	Gyrus frontal médial	20	3,85	3,70	-12	48	15

Annexe 7. Liste des 96 stimuli utilisés dans la tâche d'écriture sous dictée de l'expérimentation rTMS (chapitre IX)

Courts		Longs	
Réguliers	Irréguliers	Réguliers	Irréguliers
balcon	cachot	acrobate	bungalow
bijou	doyen	camarade	candidat
brevet	faisan	carabine	caoutchouc
butin	format	carapace	certificat
camion	fourmi	catastrophe	certitude
chimie	fusain	chirurgie	circonstance
client	fusil	compliment	commissaire
destin	genou	conclusion	coquelicot
dragon	gigot	couverture	corbillard
duvet	gilet	discussion	discipline
flacon	klaxon	document	gymnastique
folie	loyer	jalousie	harmonie
furie	notion	limonade	labyrinthe
jupon	noyau	matricule	lieutenant
melon	panier	monument	manuscrit
niveau	radio	propagande	oreiller
patrie	remous	protection	partisan
projet	repos	protocole	pharmacie
ravin	ruban	sacrifice	philosophie
sapin	studio	solution	pissenlit
savon	tabac	tabouret	restaurant
toupie	truand	territoire	sympathie
venin	tuyau	testament	syndicat
vertu	wagon	trajectoire	vagabond

Titre : Processus centraux et périphériques en production écrite de mots : études comportementales, en neuroimagerie fonctionnelle et par stimulation magnétique transcrânienne

Résumé

L'écriture est une activité composite qui fait appel à la fois à des processus linguistiques centraux (phonologiques, sémantiques, orthographiques) et à des processus périphériques et moteurs (allographiques, de préparation et d'exécution des schèmes moteurs). Dans notre travail, nous avons d'abord utilisé une approche comportementale de psycholinguistique consistant en l'enregistrement de la dynamique de l'écriture de mots isolés (temps de latence et vitesse d'écriture), pour chercher à comprendre au travers de l'étude des effets de la régularité phono-orthographique comment l'information est transmise du niveau central vers le niveau périphérique. Les résultats obtenus sont plutôt en faveur d'une architecture fonctionnelle « en cascade » dans laquelle les différents processus seraient effectués en parallèle au cours de la production écrite. Nous avons ensuite tenté de mettre en évidence les composantes centrales et périphériques du réseau cérébral impliqué dans l'écriture en réalisant tout d'abord une méta-analyse des données de neuroimagerie publiées dans la littérature puis en conduisant deux expérimentations successives en IRMf chez le sujet sain utilisant une tâche d'écriture sous dictée puis une tâche de dénomination écrite d'images. Un vaste réseau cortical et sous-cortical, principalement latéralisé à gauche, a ainsi été mis en évidence et nos données ont confirmé l'activation de deux aires cruciales dans le cortex frontal supérieur gauche et le cortex pariétal supérieur gauche. Nous avons utilisé dans un dernier travail la technique de stimulation magnétique transcrânienne (TMS) permettant de perturber l'activité cérébrale de chacune de ces deux aires pour tester des hypothèses quant à leur rôle fonctionnel. Ces derniers résultats, bien que ne permettant pas de répondre clairement aux questions posées, constituent une première approche visant à comprendre l'anatomie fonctionnelle de l'écriture par la TMS et ouvrent certaines perspectives pour la compréhension du rôle des « centres cérébraux » de la production écrite du langage.

Mots-clés

Ecriture, neuroimagerie fonctionnelle, orthographe, psycholinguistique, Stimulation magnétique transcrânienne (TMS)

Abstract

Writing is a composite activity that involves central linguistic processes (phonological, semantic, orthographic) as well as peripheral and motor processes (allographic, preparation and execution of motor patterns). In our work, we first used a behavioral, psycholinguistic approach recording the dynamics of isolated words writing (latencies and writing speed) in order to try to understand, through the study of the effects of phono-orthographic regularity, how information is transmitted from the central to the peripheral level. The results plead in favor of a "cascaded" functional architecture in which the different processes are carried out in parallel during written production. We then attempted to highlight the central and peripheral components of the cerebral network involved in writing by first conducting a meta-analysis of neuroimaging data published in the literature and then by conducting two successive fMRI experiments in healthy subjects using a writing-to-dictation task and a written picture naming task. An extensive cortical and subcortical network, mainly left-lateralized, has been identified and our data confirmed the activation of two crucial areas in the left superior frontal cortex and the left superior parietal cortex. In last study, we used the technique of transcranial magnetic stimulation (TMS), allowing disrupting the cerebral activity of each of these two areas, in order to test hypotheses regarding their functional role. Although the results did not enable to clearly answer the questions we addressed, they stand for a first approach to the understanding the functional anatomy of writing through TMS and open up some perspectives for the understanding of the role of "cerebral centers" of written language production.

Keywords

Handwriting, functional neuroimaging, spelling, psycholinguistics, transcranial magnetic stimulation (TMS)