



Influence du mode d'écriture (manuscrit ou clavier) sur l'apprentissage des lettres arabes chez l'élève débutant et corrélats cérébraux de l'écriture des lettres arabes et latines chez l'adulte bigraphe.

Elie Fabiani

► To cite this version:

Elie Fabiani. Influence du mode d'écriture (manuscrit ou clavier) sur l'apprentissage des lettres arabes chez l'élève débutant et corrélats cérébraux de l'écriture des lettres arabes et latines chez l'adulte bigraphe.. Neurosciences. Université Aix-Marseille (AMU), 2022. Français. <NNT : >. <tel-04427053>

HAL Id: tel-04427053

<https://hal.science/tel-04427053v1>

Submitted on 30 Jan 2024

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 CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License

THÈSE DE DOCTORAT

Soutenue à Aix-Marseille Université
le 9 mars 2022 par

Elie Fabiani

Influence du mode d'écriture (manuscrit ou clavier) sur
l'apprentissage des lettres arabes chez l'élève débutant et
corrélats cérébraux de l'écriture des lettres arabes et latines
chez l'adulte bigraphe.

Discipline

Biologie santé

Spécialité

Neurosciences

École doctorale

ED 62 – Sciences de la vie et de la santé

Laboratoire/Partenaires de recherche

UMR 7291 –

Laboratoire de Neurosciences Cognitives

Composition du jury

Florence BARA

Rapportrice

Université Toulouse 2

Jérôme PRADO

Rapporteur

Université de Lyon

Sonia Kandel

Examinatrice

Université Grenoble-Alpes

Xavier ALARIO

Examineur

Aix-Marseille Université

Arnaud Cachia

Examineur

Paris Descartes

Serge PINTO

Président du jury

Aix-Marseille Université

Marieke LONGCAMP

co-directrice de thèse

Aix-Marseille Université

Raphaele TSAO

co-directrice de thèse

Aix-Marseille Université

Affidavit

Je soussignée, Elie Fabiani, déclare par la présente que le travail présenté dans ce manuscrit est mon propre travail, réalisé sous la direction scientifique de Marieke Longcamp et Raphaele Tsao, dans le respect des principes d'honnêteté, d'intégrité et de responsabilité inhérents à la mission de recherche. Les travaux de recherche et la rédaction de ce manuscrit ont été réalisés dans le respect à la fois de la charte nationale de déontologie des métiers de la recherche et de la charte d'Aix-Marseille Université relative à la lutte contre le plagiat.

Ce travail n'a pas été précédemment soumis en France ou à l'étranger dans une version identique ou similaire à un organisme examinateur.

Fait à Marseille, le 10/01/2022.



Cette œuvre est mise à disposition selon les termes de la [Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Affidavit

I, undersigned, Elie Fabiani, hereby declare that the work presented in this manuscript is my own work, carried out under the scientific direction of Marieke Longcamp et Raphaele Tsao, in accordance with the principles of honesty, integrity and responsibility inherent to the research mission. The research work and the writing of this manuscript have been carried out in compliance with both the French national charter for Research Integrity and the Aix-Marseille University charter on the fight against plagiarism.

This work has not been submitted previously either in this country or in another country in the same or in a similar version to any other examination body.

Place Marseille, date 10 janvier 2022



Cette œuvre est mise à disposition selon les termes de la [Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Résumé

Les outils numériques sont de plus en plus présents dans les établissements scolaires. Ces outils sont majoritairement utilisés avec un clavier, entraînant un changement dans la façon d'écrire des élèves. Quelles sont les conséquences d'un tel changement ? Des études ont montré qu'apprendre les lettres en les écrivant à la main permettait de mieux les reconnaître que lorsqu'elles sont apprises au clavier, car le codage sensori-moteur créé par l'apprentissage manuscrit pourrait permettre de renforcer la représentation en mémoire des lettres. Mais ces études sont peu nombreuses, parfois contradictoires, et ont été conduites pendant une courte durée d'apprentissage et dans des conditions peu écologiques.

Au cours de cette thèse, nous nous sommes intéressés à l'apprentissage d'un nouveau système d'écriture, l'arabe, à la main ou au clavier, chez des élèves français en classe de 6^{ème}, en les suivant pendant deux années scolaires. Parallèlement, nous nous sommes demandés si les caractéristiques motrices du français et de l'arabe influençaient l'organisation du réseau cérébral sous-tendant le langage écrit, en analysant les particularités motrices (cinématique, sens de production...) et l'activité cérébrale (en IRMf) dans une tâche de copie de lettres arabes et françaises par des bigraphes experts.

La première étude longitudinale au collège a montré que l'écriture au clavier pouvait conduire à une meilleure connaissance des lettres en début d'apprentissage, mais que cet avantage ne se maintenait pas dans le temps. Nous avons également observé un avantage de l'écriture manuscrite sur la qualité de la forme visuelle (orientation et association allographique). Ces résultats étendent les résultats précédents à un apprentissage plus long et réalisé en contexte scolaire. Ils confirment que les représentations sensori-motrices acquises grâce à l'écriture manuscrite jouent un rôle dans l'apprentissage des lettres, tout en montrant que l'apprentissage par le clavier peut aussi favoriser certains processus d'apprentissage.

La seconde étude chez l'adulte bigraphe a confirmé que les patterns moteurs différaient dans l'écriture des lettres arabes et latines. L'analyse univariée des données IRMf recueillies pendant que les participants écrivaient ces lettres a montré que l'écriture

des deux langues partageait un réseau cérébral commun, mais que l'arabe entraînait une plus forte activation des régions pariétales supérieures bilatérales et du cervelet droit. L'analyse en 'Multi-Voxel Pattern Analysis' (MVPA) a confirmé que le codage des deux systèmes d'écriture différait dans les cortex pariétaux supérieur mais également dans plusieurs régions des deux hémisphères, notamment dans les régions somesthésiques gauches, les régions prémotrices droites et visuelles bilatérales. Ces données confirment que l'apprentissage de deux systèmes d'écriture distincts a des conséquences sur les réseaux cérébraux sensori-moteurs mis en jeu chez l'expert.

L'ensemble de ces résultats montre le rôle de la sensori-motricité sur la représentation cognitive et cérébrale des caractères alphabétiques, et l'impact possible des outils numériques. Les modifications cérébrales induites par l'apprentissage d'une langue écrite avec ses particularités graphomotrices mises en évidence dans le présent travail conduisent à considérer l'importance de la composante sensori-motrice dans la représentation en mémoire et donc pendant son apprentissage.

Mots clés : Ecriture, Apprentissage, IRMf, Clavier, Sensori-motricité, Cerveau, Bigraphisme

Abstract

There is an increase in the use of digital tools in schools. These tools are mostly used with a keyboard, leading to a change in the way children write. What are the consequences of such a change? Some studies have shown that learning letters by hand allows for better recognition than learning them with a keyboard, probably because the sensori-motor coding created by handwriting could strengthen the mental representation of letters. However, these studies are scarce, sometimes contradictory, and were conducted during a short learning period and in non-ecological conditions.

In this thesis, we investigated the learning of a new writing system, Arabic, either by hand or keyboard, in French students in grade7, by observing them during two school years. In parallel, we investigated whether the motor characteristics of French and Arabic influence the organization of the brain network underlying written language, by analyzing motor characteristics (kinematics, production direction...) and brain activity (in fMRI) in a task of copying Arabic and French letters by expert bigraphers.

The first longitudinal study in middle school showed that keyboarding could lead to a better knowledge of letters at the beginning of learning, but that this advantage was not maintained over time. We also observed an advantage of handwriting on visual form quality (orientation and allographic association). These results extend the previous findings to a longer learning process and to a school context. They confirm that sensori-motor representations acquired through handwriting play a role in letter learning, while showing that keyboard learning can also promote certain learning processes.

The second study in French/Arabic adults confirmed that motor patterns differed in writing Arabic and Latin letters. Univariate analysis of fMRI data collected while participants were writing these letters showed that writing the two languages shared a common brain network, but that Arabic resulted in stronger activation of bilateral superior parietal regions and the right cerebellum. Multi-Voxel Pattern Analysis (MVPA) confirmed that the encoding of the two writing systems differed in the superior parietal cortices but also in several regions of the two hemispheres, notably in the left somesthetic, right premotor and bilateral visual regions. These data confirm that learning two distinct

writing systems has consequences on the sensori-motor brain networks involved in the expert.

All these results show the role of sensori-motricity on the cognitive and cerebral representation of alphabetic characters, and the possible impact of digital tools. The cerebral modifications induced by the learning of a written language with its graphomotor particularities highlighted in the present work lead us to consider the importance of the sensori-motor component in the representation in memory and thus during its learning.

Keywords : Writing, Learning, fMRI, Keyboard, Sensori-motricity, Brain, Bigraphism

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Florence Bara, Sonia Kandel, Jérôme Prado, Xavier Alario, Arnaud Cachia et Serge Pinto pour avoir accepté de faire partie de mon jury de soutenance de thèse et d'évaluer mon travail.

Je remercie ensuite Jean-Luc Velay, mon directeur non-officiel, pour m'avoir permis de faire ma thèse dans le cadre du projet ARABESC. Un projet ambitieux et un peu fou qui n'a pas toujours été facile mais qui m'a énormément apporté. Je te remercie pour les conversations scientifiques et moins scientifiques, pour ta gentillesse et ton soutien dans toutes les situations.

Je remercie également Marieke Longcamp, ma directrice de thèse, officiellement arrivée à mi-parcours. Merci pour tout le temps, je sais précieux, que tu as pris pour travailler avec moi. Ton optimisme, et à la fois ton 'scepticisme', m'ont permis de beaucoup apprendre. Merci d'avoir été là pour moi.

Je remercie Raphaele Tsao, ma codirectrice de thèse, pour nos rendez-vous dans la cour de l'INSPE et nos discussions inspirantes sur le monde de l'éducation, de la recherche et de mon avenir professionnel.

Je remercie l'équipe du centre IRM : Jean-Luc Anton, Bruno Nazarian et Julien Sein. Toujours prêts à expliquer, à aider et à réfléchir autour de nouvelles questions, on ne peut imaginer une meilleure équipe pour quelqu'un qui débute l'IRMf. Je remercie également les membres du groupe de travail MVPA.

Je remercie aussi Zoubir et l'ensemble des membres du collège Saint Mauront. Zoubir je te remercie pour ton attitude toujours positive.

Merci également à tous ceux qui ont pu m'aider sur le projet ARABESC, je pense notamment à Souhila, Karima, Jean-Louis Leydet et Olivier Maurel.

Je remercie mon équipe des MuLaW, dont Aline, Mireille et Jérémy. L'entraide et l'intérêt de chacun dans les projets des autres est une force, la bonne humeur et la chaleur bienveillante aussi.

Je remercie tous les membres du LNC, pour la bonne ambiance quotidienne qui règne au laboratoire. Un merci particulier à Luciana, Julien et à certains informaticiens...

Je remercie les doctorants qui m'ont accompagnée pendant ces quatre années : Anne-K, Caro, Eva, Flo, Gaëlle, Lisa, Jean-Jean-Yves, Justine, Manon, Nada, Rébékha, et Soso. Un merci spécial pour les doctorants de LNC la S., VIP au PMU de mon cœur : Alexis pour la salle de sport, Alia pour les verres de tous les soirs, Aurélie pour les retours qui ne s'arrêtent jamais, Gabriel pour le soutien stat, Lolo pour le foooooormidable soutien, Marie pour Didier et Patrice : deux univers, Mehdi pour notre nouvelle passion à l'agachon, Momo pour la policia, et Sarah, pour les papiers et le rouge à lèvres. Je vous aime de ouf. Merci pour tous les fou-rires, toutes les bêtises et tout l'amour.

Enfin, je remercie ma famille, notamment mes parents pour m'avoir permis d'arriver là où j'en suis et pour la bonne humeur hebdomadaire, venir manger à la maison le dimanche midi fait partie de ces petits moments qui font du bien, au ventre et au cœur. Et pour finir, merci à mes mamies, pour leur soutien sans faille.

Table des matières

Affidavit	1
Affidavit	3
Résumé.....	5
Abstract.....	7
Remerciements	9
Table des matières.....	11
Introduction générale.....	15
Cadre théorique.....	21
1. La lettre et son apprentissage.....	21
1.1. Un objet visuel.....	21
1.1.1. L'analyse « bas niveau » des composantes visuelles.....	22
1.1.2. Le répertoire allographique et la représentation abstraite.....	24
1.2. Un objet verbal	29
1.3. Un objet sensori-moteur	31
1.3.1. Apprentissage du geste d'écriture manuscrite.....	31
1.3.2. Evolution du contrôle visuel de l'écriture manuscrite	35
1.3.3. Une prise en compte des informations somesthésiques pendant l'écriture ?	38
1.3.4. Modèle de l'écriture manuscrite chez l'expert.....	41
1.3.5. Apprentissage de la frappe au clavier	45
1.3.6. Régions cérébrales impliquées dans l'écriture manuscrite	51
1.3.7. Régions cérébrales impliquées dans l'écriture au clavier	54
Synthèse intermédiaire	58
2. Arguments en faveur d'une influence motrice dans la perception des lettres : Comparaison de l'apprentissage des lettres à la main et au clavier	60
2.1. Influence de la motricité sur la perception visuelle.....	60
2.2. Apport de la neuroimagerie	66
2.3. Apprendre à écrire les lettres à la main ou au clavier	68
2.3.1. Pourquoi un avantage de l'écriture manuscrite par rapport au clavier ?	69
2.3.2. La part des composantes visuelle et attentionnelle dans l'apprentissage manuscrit	73

2.3.3. L'écriture manuscrite permet-elle un meilleur apprentissage de la phonologie et de la lecture ?	75
Synthèse intermédiaire	80
3. Bigraphie et universalité des réseaux cérébraux des langues écrites	80
3.1. La bigraphie et les différents systèmes graphiques	84
3.2. Le débat de l'universalité.....	86
3.2.1. Universalité des réseaux de la lecture.....	86
3.2.2. Universalité des réseaux de l'écriture.....	89
4. Le système graphique arabe.....	93
4.1. La langue arabe	93
4.2. Caractéristiques du système graphique arabe.....	94
Objectifs.....	100
Partie Expérimentale 1 :	101
Introduction.....	102
1. Méthodes.....	104
1.1. Participants	104
1.2. Méthode d'apprentissage	104
1.3. Evaluations et déroulement de l'étude.....	113
1.4. Tests réalisés	116
1.5. Analyses statistiques.....	131
2. Résultats.....	137
2.1. Niveau initial des élèves à T0.....	138
2.2. Evolution des connaissances des lettres arabe	142
Résumé des résultats.....	165
3. Discussion	166
Partie Expérimentale 2 :	184
Introduction.....	185
1. Caractérisation graphomotrice des lettres latines et arabes	187
1.1. Méthodes	187
1.1.1. Participants	187
1.1.2. Tâche et procédure	188
1.1.3. Analyse des données.....	188
1.2. Résultats	190
1.2.1. Nombre de traits et direction	190
1.2.2. Variable spatiale, temporelles et cinématiques.....	191

1.3. Discussion.....	192
2. Expérience en IRMf	194
2.1. Méthode et paramètres d'acquisition	194
2.1.1. Participants	194
2.1.2. Stimuli	194
2.1.3. Matériel	195
2.1.4. Procédure	196
2.1.5. Acquisition IRM	197
2.1.6. Analyse et résultats des données comportementales.....	198
2.2. Analyse univariée.....	200
2.2.1. Méthode.....	200
2.2.2. Résultats de l'analyse univariée	203
2.2.3. Discussion.....	206
2.3. Analyse en MVPA (Multi-Voxel Pattern Analyses).....	211
2.3.1. Méthode.....	213
2.3.2. Résultats de l'analyse MVPA	218
2.3.3. Discussion.....	221
3. Discussion générale	230
Perspectives et conclusions	233
Références.....	241
Annexes	270

Introduction générale

L'écriture fait partie intégrante de la culture humaine. Réservée pendant très longtemps à une élite d'initiés, elle s'est démocratisée et est massivement enseignée depuis plus d'un siècle dans la grande majorité des pays dans le monde. Dans les pays occidentaux, écrire fait partie, au même titre que lire et compter, des apprentissages fondamentaux dont l'acquisition est indispensable à l'épanouissement personnel et professionnel de tout individu dans une société moderne. Elle est donc pratiquée quotidiennement par tous les enfants en âge scolaire et elle continue à l'être par un certain nombre d'adultes dans leurs activités personnelles ou professionnelles.

L'écriture est une activité hautement cognitive, qui met en jeu des processus linguistiques abstraits mais c'est également une activité sensori-motrice qui implique la main (et peut-être plus largement le corps). Elle requiert la manipulation d'outils : c'est donc également une activité technique et, comme toutes les activités techniques, elle est soumise à des évolutions régulières. Bien que les techniques d'écriture aient beaucoup évolué depuis leurs premières manifestations (voir par ex. Jean, 1987), l'écriture manuscrite s'est stabilisée depuis longtemps sous la forme qu'on lui connaît aujourd'hui qui consiste à tracer des signes sur un support, le plus souvent une feuille de papier, à l'aide d'un instrument scripteur qui laisse une trace sur ce support. C'est sous cette forme que l'écriture est encore enseignée à l'école aujourd'hui, bien que l'évolution technologique ne se soit pas interrompue depuis plus d'un siècle.

Pourtant, le mode peut-être le plus fréquent¹ d'écriture, en dehors de l'école, est l'écriture sur support numérique, depuis l'avènement des ordinateurs, smartphones et autres tablettes numériques, ainsi que des logiciels de traitement de texte qui les

¹ Il faut toutefois noter que, en dehors de quelques rares enquêtes réalisées sur de faibles échantillons pas toujours représentatifs des populations nationales, nous ne disposons pas de données quantitatives précises sur les pratiques d'écriture.

équipent. C'est en effet, l'écriture imposée par les contraintes professionnelles qui exigent des échanges de plus en plus rapides entre des individus parfois très éloignés dans l'espace. Mais, même en dehors du milieu professionnel, l'écriture numérique présente nombre d'avantages qui satisfont de nombreux utilisateurs, au point d'en faire leur mode principal d'écriture à finalité personnelle.

En premier lieu, le texte produit avec les traitements de texte et les outils dont ils sont dotés (copié/collé, correcteur orthographique, ...) peut être instantanément diffusé à un très grand nombre de lecteurs. C'est le mode d'écriture adapté à l'écriture partagée des réseaux sociaux.

Par ailleurs, et ça n'est pas anecdotique, la mise en forme du texte (orthographe, syntaxe simple...) peut être assurée par le logiciel, souvent même à l'insu de l'utilisateur, ce qui le décharge d'un certain nombre de préoccupations qui doivent être gérées dans l'écriture manuscrite.

Enfin, l'écriture dactylographique semble plus facile à produire pour les adultes qui peuvent l'apprendre en pratiquant seuls et en peu de temps. Une fois imprimée, elle est toujours lisible, contrairement à l'écriture manuscrite que de nombreux adultes ne maîtrisent pas toujours parfaitement.

Si on ajoute à ce tableau, l'image très positive dont jouit le numérique, qui est souvent présenté comme le moyen de vaincre l'échec scolaire, on comprend la proposition faite par certaines personnes de remplacer l'apprentissage de l'écriture manuscrite à l'école par l'apprentissage de l'écriture dactylographique. Ces militants de l'abandon de l'écriture manuscrite arguent du fait que c'est l'écriture la plus pratiquée en dehors de l'école et que nous sommes aujourd'hui dans une curieuse et paradoxale situation, où on apprend pendant plusieurs années à l'école une activité que l'on ne pratique plus dès qu'on la quitte !

Ils ajoutent que l'écriture au clavier serait plus facile à apprendre, que cela libérerait du temps pour apprendre d'autres matières trop souvent négligées : les langues étrangères, les matières artistiques...

Qu'en pensent les chercheurs en sciences cognitives qui s'intéressent également à ces questions d'ordre pédagogique ?

Sur le plan cognitif, de nombreuses études ont mis en évidence depuis longtemps les changements induits par l'écriture numérique dans les activités cognitives de « haut niveau » comme la composition des textes écrits (Cochran-Smith, 1991; Mueller & Oppenheimer, 2014). Un des changements induits par l'usage des ordinateurs a peut-être moins retenu l'attention : il s'agit des modifications d'écriture liées à l'usage du clavier. Ces changements ne sont pas récents, puisqu'ils datent de la création des machines à écrire. Toutefois, l'essor considérable des outils numériques pose aujourd'hui le problème à une autre échelle.

Le clavier modifie drastiquement le geste d'écriture et ses corrélats sensori-moteurs. Cela entraîne probablement des conséquences chez les personnes qui écrivent très souvent au clavier : quand elles sont amenées à écrire à la main, elles éprouvent souvent une certaine difficulté et l'aspect de leur écriture est parfois modifié. En dépit de cela, les conséquences du changement de mode d'écriture chez l'adulte, si elles sont avérées, peuvent probablement être considérées comme minimales. En effet, les adultes, durant leur scolarité ont été formés à l'écriture manuscrite traditionnelle, au moment où leur plasticité cérébrale était la plus grande : leur cerveau a donc été façonné par l'écriture manuscrite. En revanche, il pourrait en aller tout autrement si les claviers étaient systématiquement utilisés par de très jeunes enfants.

Or, aujourd'hui, avec l'arrivée massive des outils numériques à l'école, ces changements de pratique de l'écriture pourraient se produire beaucoup plus tôt, à un moment où les processus cognitifs et cérébraux qui permettent de gérer la production (l'écriture) et la perception (lecture) de l'écrit ne sont pas encore définitivement fixés. Les changements sensori-moteurs liés à une pratique si différente de l'écriture pourraient-ils avoir un impact sur les processus cognitifs et les réseaux cérébraux qui sont responsables de la perception de l'écrit et donc de la lecture ? Pour les cognitivistes intransigeants, tenants d'une représentation très abstraite de la lecture, la réponse serait probablement

négative. Pour les représentants d'un courant plus 'incarné' de la cognition, la réponse pourrait être positive. On peut en effet s'interroger sur les changements d'activité manuelle imposés par les outils numériques, qui pourrait conduire à des changements dans les représentations mises en jeu dans la perception de l'écrit.

La question relative aux changements de pratique d'écriture et à ses conséquences n'est pas récente. Des études expérimentales destinées à comparer les deux modes d'écriture ont été conduites à la fin du siècle dernier, d'abord aux USA où la pénétration des ordinateurs en milieu scolaire a précédé celle qui s'est produite en Europe quelques années plus tard. En 1990, Cunningham et Stanovich, dans une étude pionnière au titre un peu provocateur ("Early spelling acquisition: Writing beats the computer."), ont comparé l'apprentissage de l'orthographe de mots chez de jeunes élèves (6 ans) qui soit écrivaient à la main les lettres qui composaient les mots, soit les frappaient sur un clavier d'ordinateur. Ils ont observé un avantage de l'écriture manuscrite. Cette étude a suscité une série d'études similaires dont les résultats n'étaient pas toujours en accord avec la leur (voir par ex Vaughn, Schumm and Gordon "Early spelling acquisition: Does writing really beat the computer?."). Ces controverses scientifiques en disent long sur l'intérêt porté outre-Atlantique sur cette question sociétale. Trente ans plus tard, le débat reste d'actualité et s'est même largement propagé en Europe (cf Kiefer & Velay, 2016).

C'est dans ce contexte, sociétal, idéologique, pédagogique et théorique que prend sa place la recherche expérimentale que nous avons conduite pendant cette thèse et que nous présentons dans ce manuscrit. Elle s'inscrit dans le cadre de l'appel à projet e-FRAN (Espaces de Formation, de Recherche et d'Animation Numérique) issu du PIA2 (Programme d'Investissement d'Avenir 2). L'objectif était de soutenir des projets de transformation de l'École, en expérimentant « de nouvelles manières d'enseigner et d'apprendre, à partir de dispositifs pédagogiques et numériques innovants dans un cadre scientifique rigoureux ». Dans ce contexte, l'action e-FRAN visait à mettre en évidence les conditions d'utilisations efficace du numérique au service de la réussite scolaire des élèves. Parmi les lauréats, le projet ARABESC (ARABe Ecrire Stylo Clavier), proposait d'étudier si l'écriture dactylographique pendant l'apprentissage d'une langue a un impact

significatif sur les capacités à lire et à s'exprimer par écrit dans cette langue. Ce projet proposait également une réflexion sur le mode d'écriture à privilégier lors de l'apprentissage de l'écriture et sur l'utilisation générales des outils numériques en milieu scolaire.

Bon nombre d'études expérimentales ont déjà été effectuées sur la question du rôle de l'écriture manuscrite dans l'apprentissage : nous les présenterons dans la partie 'cadre théorique'. Toutefois, pour des raisons éthiques et pratiques, ces études ont été limitées à des durées courtes d'apprentissage. Au contraire, dans ce projet, il était initialement prévu de suivre les élèves pendant 3 années scolaires.

D'autre part, ce projet s'inscrivait dans une approche collaborative entre deux disciplines assez éloignées traditionnellement : - les sciences de l'éducation, pour les conséquences /adaptations pédagogiques suscitées par la comparaison entre un enseignement de l'écriture à la main et au clavier, - les neurosciences cognitives, qui cherchent à comprendre les processus cognitifs et cérébraux qui se produisent pendant les apprentissages. C'est pour répondre aux questions des neuroscientifiques que, en parallèle du suivi comportemental des élèves (évolution de l'écriture et de la lecture), des expérimentations en neuroimagerie, régulièrement espacées au cours des 3 années de l'étude, étaient prévues pour suivre chez ces élèves les changements cérébraux induits par les deux méthodes d'apprentissage de l'écriture (clavier et manuscrit). Il s'est avéré impossible de réaliser ces expérimentations, à la suite d'un grand nombre de difficultés rencontrées (nombre d'enfants insuffisant, volatilité des élèves d'une année à l'autre, méfiance des parents...). Les restrictions sanitaires que nous avons subies au printemps 2020 ont définitivement réglé la question.

Par ailleurs, afin de pallier les problèmes éthiques, et ne pas pénaliser des enfants qui n'apprendraient pas à écrire à la main au début de leur scolarité, nous avons décidé de nous intéresser à l'apprentissage d'une langue seconde, basée sur un système graphique et alphabétique différent du nôtre : l'arabe.

Comme nous le présenterons plus en détail dans le contexte théorique, ce choix méthodologique a conduit à de nouvelles questions théoriques car les élèves impliqués dans le protocole expérimental 1- étaient plus âgés que ceux qui débutent l'apprentissage de l'écriture habituellement, 2- avaient déjà une pratique de plusieurs années de l'écriture manuscrite du français, 3- apprenaient à parler, lire et écrire un nouveau langage et allaient de ce fait devenir bilingues et 'bigraphes'.

En parallèle de la question principale portant sur les deux modes d'apprentissage de l'écriture, de nouvelles questions théoriques se sont imposées à nous :

- Tous les systèmes graphiques sont-ils équivalents du point de vue des processus cognitifs et cérébraux impliqués ? Qu'en est-il en particulier de l'arabe qui s'écrit de droite à gauche ?
- Que se produit-il au niveau cérébral chez des individus qui maîtrisent ces deux systèmes graphiques ?

Au cours de cette thèse, deux expérimentations ont donc été conduites en parallèle :

- L'une en milieu scolaire qui porte sur la comparaison de l'apprentissage de l'écriture arabe à la main et au clavier,
- L'autre en laboratoire, sur les réseaux cérébraux mis en jeu dans l'écriture de caractères alphabétiques chez des adultes bigraphes, experts dans les deux langues.

La partie 'cadre théorique' qui va être présentée dans ce qui suit, est donc structurée à partir de cette double approche.

Cadre théorique

1. La lettre et son apprentissage

1.1. Un objet visuel

L'identification des lettres est le point de départ de la reconnaissance des mots et de la lecture (Pelli et coll., 2004). Chez l'expert, cette identification se fait de façon automatique et très rapide, malgré un large spectre de formes différentes pour chaque lettre (différentes polices de caractères, écritures manuscrites, casses...). En effet, une particularité des lettres est qu'elles peuvent être présentées sous des formes visuelles extrêmement différentes (A/a), on parle alors d'allographes ('A' et 'a' sont des allographes de la lettres [A]). Dans le système latin, les lettres ont en général deux allographes (la forme majuscule et la forme minuscule) mais il peut y en avoir d'avantage (comme le 'ɑ' qui est un autre allographe minuscule de la lettre [A]). Dans le domaine de la perception visuelle, les scientifiques se sont posé trois questions concernant les lettres : 1. Comment pouvons-nous reconnaître sans difficulté une lettre présentée sous une forme visuelle très rarement vue, voire nouvelle ()? 2. Comment pouvons-nous différencier deux lettres visuellement très proches (I/J)? 3. Comment pouvons-nous reconnaître une lettre malgré des allographes visuellement très différents (a /A)? C'est pendant l'apprentissage des lettres que les processus sous-tendant ces capacités perceptives vont se mettre en place jusqu'à devenir automatiques.

Comme le plus fréquemment, la perception des lettres se produit pendant la lecture et que la lecture est une activité qui mobilise essentiellement la vision chez la grande majorité des individus (sauf chez les non-voyants qui savent lire en Braille et pour lesquels la modalité sensorielle concernée est le tact fin), les processus les plus souvent étudiés dans la reconnaissance des lettres sont les traitements visuels.

1.1.1. L'analyse « bas niveau » des composantes visuelles

On considère aujourd'hui que les lettres sont reconnues, non pas à partir d'une image globale de la lettre, mais à partir des différentes composantes visuelles (ou « visual features ») composant cette lettre (Riesenhuber & Poggio, 1999 ; Pelli et coll., 2004 ; Grainger et coll., 2008 ; Testolin et coll., 2017 ; Selfridge & Neisser, 1960). La figure 1 montre, à titre d'exemple, les 10 composantes visuelles décrites par Fiset et coll. (2009) pour la lettre A.

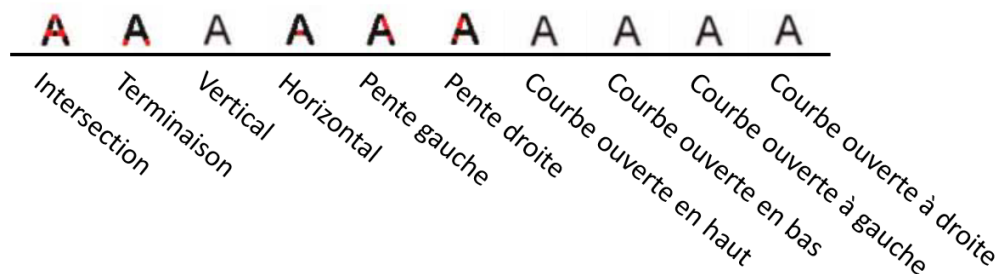


Figure 1 : Exemple des composantes visuelles étudiées par Fiset et coll. (2009) pour lettre A.

Les composantes visuelles sur lesquelles se base la reconnaissance des lettres, ont pu être décrites dans des études comportementales dans lesquelles on mesure la proximité visuelle entre deux lettres. Différents protocoles et différentes variables ont été utilisés : la fréquence de confusion entre deux lettres (par exemple Geyer & DeWald, 1973 ; Gibson, 1969 ; Keren & Baggen, 1981 ; Pelli et coll., 2004 ; Wiley et coll., 2016), le temps de réaction pour dire si deux lettres sont les mêmes ou non (Podgorny & Garner, 1979 ; Pelli et coll., 2004 ; Wiley et coll., 2016), ou encore des études de masquage partiel des lettres (Fiset et coll., 2008 ; Fiset et coll., 2009). Par exemple, Fiset et coll. (2008) ont présenté visuellement, pendant une période brève (200 ms), des lettres dont certaines parties étaient masquées. En demandant aux participants d'identifier la lettre présentée, et en analysant les taux de réponses correctes en fonction des parties cachées, les auteurs ont pu classer l'importance des différentes composantes visuelles. Ils ont ainsi montré, pour

les lettres latines, l'importance des terminaisons dans la reconnaissance des lettres. Cette caractéristique serait plus stable et moins sensible aux variations de forme des lettres (par exemple, un A peut s'écrire sans les pentes obliques ' / ' et ' \ ' (par exemple 'A') mais s'écrit difficilement sans deux terminaisons).

Au niveau cérébral, la théorie des composantes visuelles s'appuie sur le fonctionnement de la voie corticale ventrale du système visuel. Fukushima (1988) reprend l'organisation hiérarchisée de la perception visuelle : les neurones des régions visuelles primaires répondent sélectivement à des composantes locales des stimuli, dans une certaine orientation (Hubel & Wiesel, 1962) alors que les neurones des régions de plus haut niveau d'intégration vont répondre préférentiellement à des formes (cercle, triangle, carré) ou encore à des visages (Dehaene, 2007). Au fur et à mesure de l'avancée le long de la voie ventrale, les populations neuronales réagissent donc à des traitements de plus en plus complexes (Testolin et coll., 2017). Ainsi, dans une approche de modélisation neuronale, la perception d'une lettre activerait les composantes correspondantes visuelles primaires, puis ces activations seraient ensuite regroupées dans des unités de plus en plus complexes, dans une multitude de couches hiérarchisées, jusqu'à activer la forme visuelle de la lettre (Riesenhuber & Poggio, 1999 ; Grainger et coll., 2008). Cette théorie se base aussi sur une modélisation informatique de l'apprentissage, et notamment de l'apprentissage non-supervisé de patterns (Selfridge, 1959). En rencontrant de nombreux exemplaires d'un allographe d'une lettre, le système devient capable de reconnaître cet allographe dans une nouvelle police, grâce à la création d'un pattern de composantes pour cet allographe (Selfridge, 1959). Par conséquent, apprendre la forme des lettres revient à apprendre implicitement (parfois explicitement si ces composantes sont décrites verbalement par l'enseignant) les composantes de chacun des allographes des lettres, et de plus, à s'affranchir des différentes tailles et couleurs de l'écriture (Ramus, 2003).

1.1.2. Le répertoire allographique et la représentation abstraite

Comment peut-on relier entre eux, et associer à une même identité, les différents allographes d'une lettre ?

Pour résoudre ce problème, les chercheurs ont eu recours à une représentation des lettres non directement attachée à une forme visuelle, mais abstraite et codant pour l'identité des lettres. Les modèles actuels de la perception des lettres (Grainger et coll., 2008 ; Schubert & McCloskey, 2013 ; Rothlein & Rapp, 2014 ; Rothlein & Rapp, 2017) distinguent donc trois niveaux de traitement dans la reconnaissance des lettres : un niveau de traitement des composantes visuelles, un niveau allographique et un niveau codant l'identité des lettres, indépendamment de l'allographe (voir figure 2).

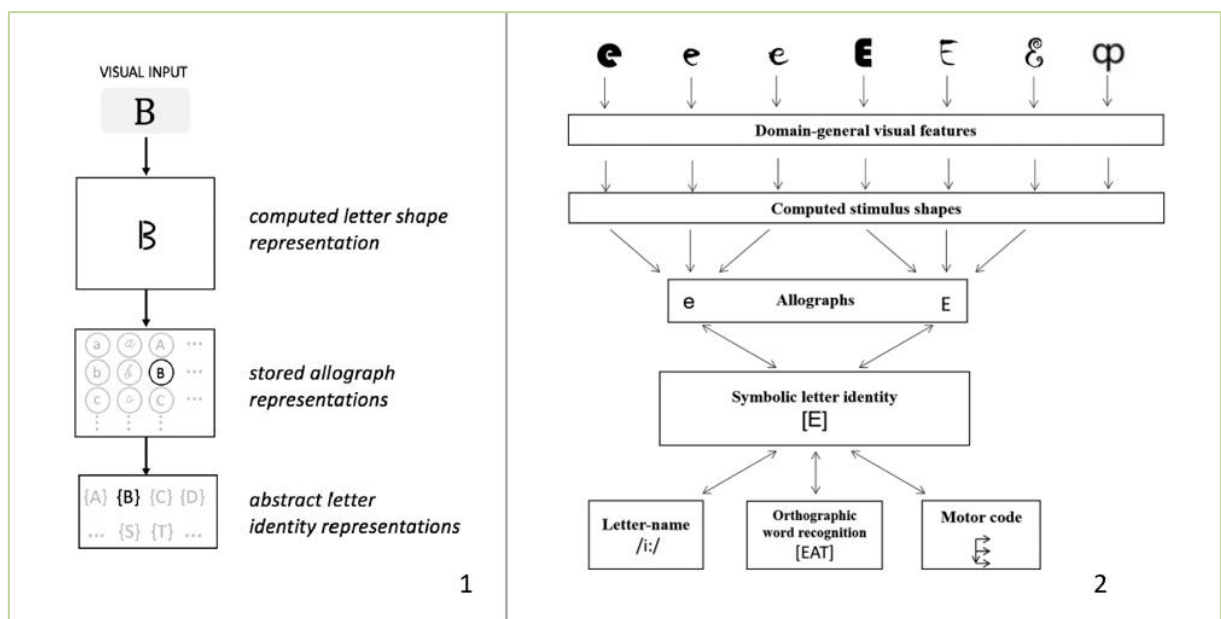


Figure 2 : Modèle fonctionnel représentationnel de la perception des lettres. 1. Modèle de Schubert & McCloskey (2013), extrait de Schubert et coll., (2018). 2. Modèle de Rothlein & Rapp (2017).

La reconnaissance des lettres commence par l'analyse des composantes visuelles, comme nous l'avons décrit dans la partie précédente. L'association des différentes composantes (appelée '*computed letter shape*' par Schubert et McCloskey (2013), puis

corrigée en '*computed stimulus shape*' par Rothlein et Rapp (2017), car cette analyse computationnelle peut également être effectuée pour des pseudo-lettres) va alors activer la représentation de l'allographe correspondant, stocké en mémoire à long terme. Cette représentation est indépendante du style d'écriture (soit des variations A/A) mais spécifique à la forme de chaque allographe (a/A). L'activation de cette représentation allographique va à son tour activer une représentation abstraite contenant l'identité de la lettre. L'existence d'une représentation purement visuelle a été étayée par la description de patients pouvant dire si un stimulus présenté visuellement était une lettre ou pas mais, incapables de dire de quelle lettre il s'agissait. De plus, lorsque deux allographes étaient présentés, les patients n'étaient pas capables de dire si ces deux allographes appartenaient ou non à la même lettre (Miozzo & Caramazza, 1998 ; Schubert & McCloskey, 2013). Dans une conception toujours très hiérarchisée des processus de traitement, il est donc nécessaire de se créer une représentation plus abstraite, de plus haut niveau, contenant l'identité de la lettre, indépendamment de sa forme visuelle. Cette sur cette représentation, qui a été appelée '*Symbolic Letter Identity*' (SLI) par Rothlein et Rapp (2017) ou encore '*Abstract Letter Identity*' (ALI) par Schubert et McCloskey (2013) que convergent les différents allographes. Le modèle de Rothlein et Rapp (2017, figure 2.2) propose qu'une fois l'identité de la lettre retrouvée, cette activation permettrait ensuite d'accéder aux autres modalités de la lettre (comme le nom de la lettre, ou sa composante motrice) et également aux correspondances grapho-phonémiques (phonèmes) de la lettre, dans le cas de la lecture. En plus d'apprendre les composantes visuelles des allographes et les avoir stockées dans une représentation allographique visuelle, il est donc nécessaire d'apprendre l'identité abstraite des lettres pour pouvoir lier les allographes d'une même lettre entre eux, et reconnaître une lettre.

Au niveau cérébral, une région a été particulièrement étudiée dans le traitement visuel de l'écrit ces vingt dernières années, au point qu'elle est nommée aujourd'hui l'aire visuelle de la forme des mots ('*Visual Word Form Area*', VWFA). Elle se situe dans la partie postérieure du gyrus fusiforme gauche, à la frontière entre le cortex visuel et les régions linguistiques. La spécialisation de cette région a été montrée dans des études en IRM fonctionnelle (IRMf) dans lesquelles on a pu observer qu'elle répondait préférentiellement à des mots écrits relativement à des objets ou à des visages (Cohen,

2003 ; Dehaene et coll., 2011). De façon intéressante, cette région traite des mots mais n'est pas sensible aux allographes utilisés pour écrire ces mots (Cohen et coll., 2002 ; Cohen & Dehaene, 2004) suggérant qu'elle n'est pas concernée par les traitements de bas niveau purement visuel (Dehaene et coll., 2011). Plusieurs études ont aussi confirmé un rôle spécifique du gyrus fusiforme gauche dans la reconnaissance des lettres isolées (Polk et coll., 2002 ; James et coll., 2005 ; James & Gauthier, 2006), même si, pour certains auteurs, la localisation de la région spécifique aux lettres serait plus antérieure que celle dédiée aux mots (voir figure 3 gauche ; James et coll., 2005 ; Joseph et coll., 2006). Selon James et Gauthier (2006) cette activité dans le gyrus fusiforme serait présente lors de tâches nécessitant d'accéder à l'identité des lettres mais pas lorsqu'il s'agit de perception visuelle passive des lettres ou d'une tâche nécessitant une analyse visuelle uniquement (James & Gauthier, 2006). Cette région a donc été proposée comme support de la représentation abstraite des lettres (Polk et coll., 2002 ; Rothlein & Rapp, 2014). En soutien à l'existence d'une représentation abstraite, Rothlein et Rapp (2014) ont montré que la partie médiane du gyrus fusiforme avait une activité neurale similaire pendant la perception visuelle de deux allographes appartenant à une même lettre. Cette région n'était pas sensible à la ressemblance visuelle entre les lettres, suggérant donc un codage d'une représentation abstraite (figure 3 milieu et droite).

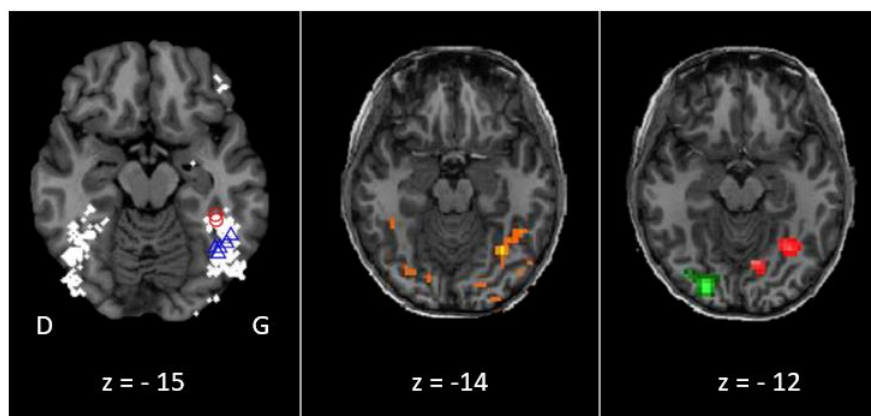


Figure 3 : Localisation de régions répondant à la perception des lettres chez des adultes experts.

Gauche : Méta-analyse de Joseph et coll. (2006) ; les cercles rouges correspondent à des régions spécifiques aux lettres et les triangles bleus représentent les régions spécifiques des mots. Les régions blanches correspondent à l'activité moyenne d'un groupe de sujets répondant à des lettres et des objets.

Milieu : Région dont l'activité était similaire pour des allographes différents d'une même lettre ; extrait de Rothlein et Rapp (2014).

Droite : comparaison des régions dont l'activité était similaire pour des allographes différents d'une même lettre (en rouge) et dont l'activité était similaire pour des allographes visuellement proches (en vert). On peut voir que les deux ne se superposent pas, extrait de Rothlein et Rapp (2014).

Au cours de l'acquisition de la lecture, cette région va peu à peu se spécialiser dans la reconnaissance des caractères écrits. Des études longitudinales ont permis de suivre la mise en place de cette spécialisation chez l'adulte en cours d'alphabétisation (Dehaene et coll., 2010) et chez l'enfant (Dehaene-Lambertz et coll., 2018). Avant l'apprentissage de la lecture, le gyrus fusiforme répond préférentiellement à la perception de visages et d'outils (Dehaene & Cohen, 2007). Avec la répétition, les populations neurales de cette région se « recyclent » et se spécialisent dans le traitement visuel de ces objets particuliers que sont les lettres et leurs multiples combinaisons (Dehaene & Cohen, 2007 ; Dehaene et coll., 2015). Un groupe de neurones qui contribue normalement à classer dans une même catégorie des objets équivalents malgré des différences de forme, de taille etc... voit donc une partie de son activité détournée vers le traitement des caractères alphabétiques. C'est une démonstration pertinente des adaptations importantes qui se produisent dans le cerveau humain sous l'effet de l'apprentissage du langage écrit.

Toutefois, pour la grande majorité des objets, l'orientation dans l'espace n'est pas une caractéristique pertinente à considérer. En effet, la plupart des objets vus sous différents

angles sont toujours les mêmes objets (Bornstein et coll., 1978). Un phénomène dit d'*invariance en miroir* s'est donc développé dans le traitement visuel des objets, qui permet d'éviter d'avoir à apprendre toutes les orientations spatiales d'un même objet pour le reconnaître ensuite avec certitude (Corballis & Beale, 1976 ; Dehaene, 2007).

Or, les lettres sont des objets très particuliers pour lesquels l'orientation est une dimension cruciale. En effet, un 'b' n'est pas un 'd', un 'p' n'est pas un 'q'. Par conséquent, au moment de l'apprentissage des lettres, l'invariance en miroir qui se produit automatiquement dans le traitement visuel des objets doit être inhibée afin de ne pas confondre les lettres symétriques par rapport à un axe vertical ou horizontal (Pegado et coll., 2011, Pegado et coll., 2014). De fait, les confusions entre les lettres et leurs images en miroirs sont courantes en début d'apprentissage des lettres, mais, vers 6-7 ans, les enfants sont capables de passer au-delà de cette difficulté (Cornell, 1985 ; Schott, 2007). Un nombre important de travaux a été consacré à la confusion entre les lettres et leur image en miroir. Au niveau cérébral, il a été montré que certaines régions du gyrus fusiforme n'étaient pas sensibles à l'orientation des images mais l'étaient pour l'orientation des mots (Dehaene et coll., 2005, 2010, 2015; Pegado et coll., 2011 ; figure 4). Pendant l'apprentissage des lettres, le gyrus fusiforme va donc se spécialiser dans le traitement des lettres et inhiber des propriétés innées, comme l'invariance en miroir.

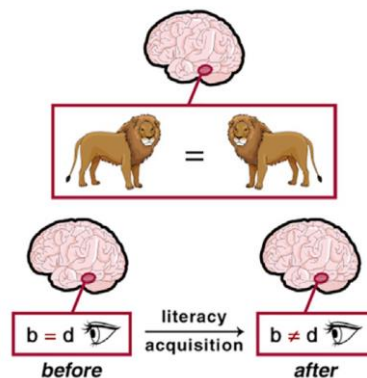


Figure 4 : Illustration du changement spécifique pour les lettres dans le traitement en miroir au niveau du gyrus fusiforme gauche. Extrait de Torres et coll. (2021).

Les modèles de reconnaissance et d'apprentissage des lettres sont issus du domaine de la perception visuelle et de l'apprentissage (programme learning). Cette conception est évidemment très simplifiée, car l'identification des lettres ne se fait pas isolément mais en fonction d'un contexte. Par exemple, dans les modèles de Schubert et McCloskey (2013) et de Rothlein et Rapp (2014), il y a une perte de l'information concernant la casse à laquelle appartient l'allographe perçu. Or, comme cela a été soulevé par Schubert et McCloskey (2013), cette information peut être utile à la lecture pour différencier le prénom 'Bill' du mot anglais 'bill' par exemple. Plus généralement, le contexte n'est pas pris en compte (McClelland & Rumelhart, 1981). De plus, dans ces modèles, l'activation est sérielle et ne prend pas non plus en compte de possibles effet top-down. Or, on sait que les régions occipitales et occipito-temporales reçoivent des messages de régions de plus haut niveau de traitement cognitif (Price & Devlin, 2011). Enfin, comme nous le verrons par la suite, l'identification visuelle des lettres ne repose pas uniquement sur le gyrus fusiforme, mais sur un réseau multimodalitaire (James & Gauthier, 2006 ; Longcamp et coll., 2003).

1.2. Un objet verbal

Connaître les lettres, leur nom et leur forme visuelle, n'est pas une finalité. Les lettres sont des signes qui prennent toute leur signification lorsqu'elles sont associées entre elles pour former les mots du langage véhiculé par l'écrit. Dans les systèmes alphabétiques, où un graphème est associé à un phonème, l'apprentissage de la lecture se fait par l'apprentissage du décodage. L'apprenant va devoir comprendre le principe alphabétique puis apprendre explicitement les règles d'association entre les graphèmes et les phonèmes, le fameux « b-a-ba » (Sprenger-Charolles & Ziegler, 2019). Pour comprendre le principe alphabétique, l'enfant doit comprendre que les mots se découpent en unités sous-lexicales phonologiques (les racines, les syllabes et les phonèmes), ce que l'on appelle la conscience phonologique, qui arrive naturellement vers l'âge de 5-6ans (Ramus, 2003). Le nom des lettres permet de faciliter l'identité phonologique et symbolique des lettres (Foulin, 2005 ; Foulin, 2007). Une fois que l'enfant a appris de façon formelle les règles grapho-phonémiques (vers 6-7ans, Zesiger et coll., 2000), il va passer à une phase

d'auto-apprentissage. Chaque fois qu'un mot connu est correctement décodé, c'est-à-dire que l'enfant retrouve, à partir d'une suite de graphèmes, un mot dans son stock lexical, les connexions entre les graphèmes lus et le mot vont être renforcées (Share, 1995 ; Ziegler et coll., 2014). Avec l'exposition répétée à un mot, l'enfant se crée et renforce une représentation orthographique du mot. Le mode sériel et laborieux du décodage est progressivement remplacé par le traitement de différentes unités psycholinguistiques (graphèmes, syllabes, morphèmes ou mots) en parallèle, ce qui permet au lecteur expert de lire environ 3 à 4 mots par seconde avec une aisance et une fluence qui donnent une fausse impression de lecture globale des mots (voir aussi Dehaene et coll., 2011 ; Rayner et coll., 2001 ; Ziegler et coll., 2019). Grâce au répertoire orthographique, l'enfant va apprendre de nouvelles règles d'association implicites (Ramu, 2003) comme la non-prononciation de certaines lettres dans le mot, par exemple la lettre 'e', en fin de mot).

Les caractéristiques des lettres dont nous avons fait état jusqu'à présent sont celles qui sont utilisées et mises en jeu dans la lecture qui est une activité perceptive, essentiellement basée sur la modalité visuelle. Cependant, pendant l'apprentissage de la forme visuelle des lettres qui est nécessaire à la lecture, les élèves apprennent également à écrire les lettres. Les deux apprentissages, pourraient être dissociés dans le temps : on apprendrait à lire dans un premier temps, puis secondairement à écrire. Mais en France, le parti qui a été pris depuis longtemps est d'enseigner les deux pratiques simultanément, ou presque, dès l'école maternelle. Les élèves apprennent donc une représentation motrice et sensorielle spécifique, relative au mouvement qui permet de tracer les lettres. Cette représentation sensori-motrice n'a pas toujours été incluse dans les modèles dédiés à la lecture et, plus largement, son rôle dans la reconnaissance des caractères n'a pas souvent été considéré dans les études consacrées à la lecture. Ce sont plutôt les chercheurs qui s'intéressent à la production des lettres, donc à l'écriture, qui ont proposé des modélisations dans lesquelles cette représentation motrice trouve toute sa place.

Si le mode d'écriture enseigné au moment de l'apprentissage initial change, en changeant profondément les mouvements utilisés pour écrire les lettres, l'impact sur leur représentation sensori-motrice sera certainement considérable. Quel sera en retour l'impact sur la connaissance des caractères ? C'est la question qui est au cœur de cette thèse. Dans ce qui suit, nous allons présenter tout d'abord l'apprentissage et

l'automatisation de l'écriture manuscrite, car ce domaine est bien documenté, puis nous présenterons l'apprentissage et l'automatisation de l'écriture au clavier en comparaison avec l'écriture manuscrite afin de mettre en évidence les similitudes et les différences entre deux modes d'écriture : l'écriture manuscrite et dactylographique.

1.3. Un objet sensori-moteur

Savoir écrire les lettres est la première étape de l'écriture manuscrite. Maîtriser et automatiser le geste graphomoteur est essentiel pour pouvoir se concentrer sur les aspects cognitivement plus complexes de l'écriture comme l'orthographe ou encore l'agencement des idées dans la rédaction d'un texte. L'apprentissage de l'écriture fait partie des apprentissages moteurs les plus complexes pour des enfants qui n'ont pas encore une maîtrise totale de leur motricité manuelle fine. Avant de parvenir à écrire grâce à des mouvements extrêmement rapides et précis, comme la majorité des adultes, l'enfant doit donc passer par un apprentissage long et rigoureux.

1.3.1. Apprentissage du geste d'écriture manuscrite

L'évolution de l'écriture chez l'enfant, au fur et à mesure de son apprentissage, est aujourd'hui bien documentée. L'apprentissage du geste d'écriture, commence par un apprentissage informel, où l'enfant apprend à tenir le stylo, à positionner son corps par rapport à l'espace de travail, à appréhender l'espace de la feuille et l'effet de ses mouvements sur la trace produite (Zesiger et coll., 2000). En France, l'apprentissage de l'écriture (et de la lecture) commence très tôt, vers 3 ans, alors que l'enfant est encore en plein développement. Le développement de l'écriture est donc lié au développement physique et cérébral (Chartrel & Vinter, 2004). Par exemple, les caractéristiques cinématiques des mouvements graphiques chez les enfants les plus jeunes, qui copient les lettres avec des mouvements larges et impulsifs, mettent en évidence la nécessité d'une maturation motrice pour pouvoir contrôler avec précision ces mouvements fins en

intégrant les retours sensoriels (Chartrel & Vinter, 2004 ; Palmis et coll., 2017 ; Séraphin Thibon et coll., 2019).

Quand la tenue du stylo est acquise par l'enfant, parfois imparfaitement, il commence à recopier des lettres, traits après traits, de façon lente et rigoureuse, avec un certain tremblement (Zesiger, 2000). En début d'apprentissage, l'agencement des traits n'est pas toujours réussi et leur taille relative n'est pas toujours respectée. L'enfant lève le stylo entre les traits, pour vérifier visuellement le trait produit et planifier le trait suivant. En effet, à ce stade, le contrôle des mouvements est principalement visuel et se fait de façon rétroactive, c'est-à-dire après le mouvement (Meulenbroek & Van Galen, 1989 ; Mojet, 1991 ; Zesiger, 1995 ; Chartrel & Vinter, 2004). De plus, la pression exercée sur le support est forte, ce qui traduit une tension musculaire importante et un engagement moteur global. Entre 3 et 4 ans l'enfant se crée un ensemble primitives graphiques, qui serviront par la suite à produire les lettres (Chartrel & Vinter, 2004).

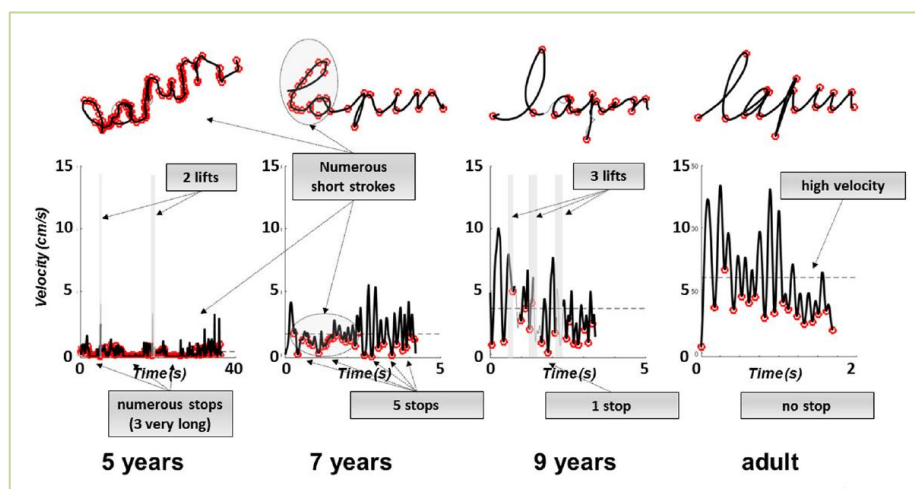


Figure 5 : Evolution de la cinématique d'écriture. Extrait de Palmis et coll. (2017). Partie haute : écriture du mot « lapin » écrit par un enfant de 5,7 et 9 ans et un adulte. Les points rouges correspondent au minimum de vitesse. Partie basse : Profil de vitesse en fonction du temps.

L'analyse de la cinématique de l'écriture, c'est-à-dire des déplacements du stylo en fonction du temps, a permis d'étudier comment nous passons de cette écriture trait à trait,

saccadée, à une écriture fluide. La figure 5 présente l'écriture du mot « lapin » par des enfants de 5, 7 et 9 ans et par un adulte. Les points rouges représentent les minimums de vitesse, c'est-à-dire les moments où le mouvement (mesuré par les déplacements de la pointe du stylet) ralentit avant de réaccélérer. Beaucoup de ralentissements sont normaux dans l'écriture experte qui obéit à la loi dite de la puissance 2/3 (Lacquaniti et coll., 1983). Selon cette loi, la vitesse est liée à la courbure de la trajectoire, on observe une accélération dans les traits droits et un ralentissement dans les courbes, qui peut même aller jusqu'à un arrêt lors des changements de direction. On peut voir sur la figure 5 que chez l'adulte, les minimums de vitesse se situent aux changements de direction. Au contraire, à 5 ans il y a de nombreux minimums de vitesse, même dans les parties rectilignes, ce qui traduit un manque de fluidité du mouvement. Leur nombre diminue avec l'âge jusqu'à arriver à l'écriture fluide de l'adulte. Le mouvement des jeunes enfants est constitué d'un grand nombre de petits traits élémentaires ('*strokes*'), délimités par deux minima de vitesse, soit une accélération suivie d'une décélération. L'enfant n'est pas en mesure de programmer des traits de plus grande taille. Peu à peu, avec le développement psychomoteur couplé à la pratique du geste graphique, l'enfant réussit à regrouper les traits élémentaires en unités de taille plus importante. Ce phénomène de regroupement ('*chunking*') est central dans l'apprentissage graphomoteur (Grossberg & Paine, 2000 ; Gobet et coll., 2016 ; Palmis et coll., 2017).

Grossberg et Paine (2000) parle d'une phase de copie en imitation où la lettre est copiée petit trait par petit trait, en utilisant comparant visuellement, entre chaque trait, la position désirée et la position effective de la pointe du stylo pour corriger le mouvement. Ce modèle décrit notamment l'évolution des traits courbes, qui sont particulièrement difficiles à produire chez les jeunes enfants (Treiman & Kessler, 2014 ; Séraphin Thibon et coll., 2019).

Dans une étude récente (Séraphin Thibon et coll., 2019), 108 enfants de 6 à 10 ans ont copié des pseudo-mots en lettres majuscules sur une tablette graphique. Les auteurs ont observé qu'entre 6 et 7 ans, la durée des mouvements (tracés et en l'air) et la disfluente diminuaient, puis restaient stables entre 8 et 10 ans. La vitesse augmentait de 6 à 8 ans

puis se stabilisait entre 8 et 9 ans, pour augmenter à nouveau vers 10 ans. Ils ont proposé que cette période, où la vitesse se stabilise (8-9ans) correspond à la période d'automatisation où l'enfant privilégie et entraîne sa compétence graphique ('proficiency') au détriment de la durée d'écriture. Cette compétence gestuelle est maîtrisée et automatisée vers l'âge de 10 ans, ce qui permet une accélération de la production jusqu'à l'âge de 11-12ans, où l'écriture va allier rapidité, fluidité et régularité, même si certains paramètres évoluent encore un peu au cours de l'adolescence, avec une personnalisation de l'écriture et une écriture plus rapide au détriment de la lisibilité (Chartrel & Vinter, 2004 ; Zesiger et coll., 2000).

Cette évolution de la cinématique de l'écriture traduit un changement dans la façon de produire les lettres. Parallèlement à l'apprentissage de la forme visuelle des lettres, en répétant quotidiennement leur tracé, les enfants vont mémoriser une représentation motrice des lettres et les produire avec une forme de plus en plus constante (Zesiger et coll., 2000). En effet, une caractéristique de l'écriture est que les lettres produites par une personne ont la même forme quelle que soit leur taille mais également quelle que soit la partie du corps utilisée pour écrire. Dans les études conduites dans les années 80-90, il a été proposé que chez l'expert, les mouvements nécessaires pour produire les lettres étaient réalisés en suivant un patron moteur ('*motor pattern*') centralement mémorisé et représenté. Propre à chaque allographe, le patron moteur spécifie la séquence, la direction et la taille relative des traits, sans spécifier la taille absolue ou les muscles d'un effecteur particulier (Ellis, 1988 ; van Galen, 1980, 1991). Le patron moteur a été comparé à un programme informatique : il s'agirait d'un programme qui peut produire différentes sorties selon les paramètres indiqués, la performance motrice observée dépendant directement des paramètres entrés dans le programme. Les aspects invariants des sorties correspondent aux spécificités du programme, non dépendantes des paramètres (Schmidt, 1976 ; Gentner, 1987). L'invariance spatiale selon la taille d'écriture et l'effecteur, ainsi que la relation entre la taille et la vitesse, suggèrent donc que ces propriétés sont codées dans le patron moteur. L'élève se construit donc une représentation motrice et passe d'une production trait par trait à l'allographe entier.

L'écriture étant extrêmement couteuse en ressource attentionnelle et en capacité de mémoire de travail, l'activation de ces programmes moteurs permet d'utiliser moins de ressource attentionnelle. Au fur et à mesure de son évolution, l'enfant va automatiser le geste moteur à effectuer ce qui lui permet de focaliser son attention vers les processus plus exigeants que sont la planification et la révision de son texte (Zesiger, 2003 ; Pleau & Lavoie, 2016).

1.3.2. Evolution du contrôle visuel de l'écriture manuscrite

L'importance du retour visuel dans l'écriture manuscrite a été décrite depuis longtemps (Paillard, 1990). Chez l'adulte expert, le retour visuel n'est pas nécessaire pour former les lettres, on parle de la composante 'morphocinétique' de l'écriture (Paillard, 1990 ; van Doorn & Keuss, 1992). Cela confirme que l'écriture des lettres se fait sur la base d'un patron moteur, défini à priori. Cependant, Smyth & Silvers (1987) rapportent que supprimer le retour visuel en cours d'écriture peut entraîner des erreurs de répétition ou d'omission dans les lettres contenant des successions de traits semblables (comme le u ou le m ; voir figure 6.2), suggérant que le retour visuel peut servir à mettre à jour la mémoire motrice. Enfin, dans une seconde étude, Smyth (1989) a aussi montré que les participants avaient tendance à moins lever le stylo lorsqu'ils écrivaient sans retour visuel. De plus, si les informations visuelles ne sont pas essentielles chez l'adulte, Marquardt et coll., (1996) ont montré qu'elles étaient bien traitées et intégrées pendant l'exécution et qu'elles pouvaient modifier la paramétrisation du mouvement, comme la taille des strokes. Dans la tâche qu'ils ont utilisée, les participants devaient produire deux fois la lettre 'l' et les auteurs modifiaient la taille sur l'écran de l'écriture du premier l, en le rendant plus grand (133%) ou plus petit (66%). Ils ont observé que les participants avaient tendance à modifier la taille du second 'l' à l'opposé de la déformation imposée au premier 'l' (Marquardt et coll., 1996).

De plus, certains auteurs ont observé que l'absence de retour visuel, chez des experts produisant une suite de lettres, entraînait une augmentation de la taille d'écriture et de la pression exercée (van Doorn & Keuss, 1992 ; van Doorn & Keuss 1993). Selon eux, cela

permettrait d'augmenter la sensibilité aux informations tactilo-kinesthésiques. Au niveau de la lettre, Chartrel & Vinter, 2006 ne trouvent pas d'effet de l'absence de vision sur la taille des lettres, mais confirment une augmentation de la pression. Cependant, l'absence de vision ne semble pas diminuer la fluidité avec lesquelles les lettres sont formées (Marquardt et coll., 1996 ; Chartrel & Vinter, 2006).

En plus de la formation des lettres, l'écriture manuscrite comprend également des mouvements en l'air permettant de se positionner dans l'espace (mouvements permettant de déplacer la main dans la page, de faire les retours en arrière dans la phrase pour rajouter un élément graphique comme la barre d'un t...). On parle alors de la composante 'topocinétique' qui correspond à des mouvements requérant des repérages spatiaux d'une grande précision et des déplacements orientés rigoureusement calibrés en direction et en amplitude (Paillard, 1990). Pour réaliser ces mouvements, il faut guider le stylo vers un point précis, ce qui nécessite de voir ce qui a été écrit. Smyth & Silvers, (1987) ont montré qu'en absence de vision de ce qui est écrit, les scripteurs ne placent pas bien les barres des t ou encore écrivent moins horizontalement (Smyth & Silvers, 1987; Paillard, 1990 ; voir figure 6.1.).

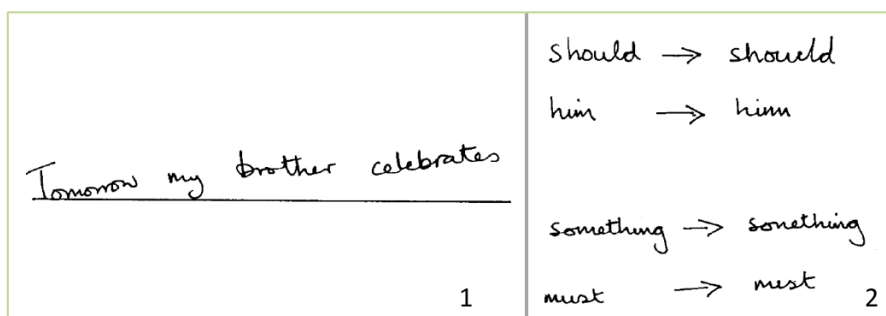


Figure 6 : A. Exemple d'écriture produite par un sujet sain les yeux fermés (d'après Smyth & Silvers, 1987).

La vision joue donc un rôle essentiel dans l'écriture mais, en l'absence de vision, l'adulte expert peut continuer à écrire au moins la forme des lettres. Cependant, comme nous l'avons déjà évoqué, chez l'enfant la première étape de l'acquisition de l'écriture consiste à recopier les lettres trait par trait et implique donc fortement la vision. Une étude de

Chartrel et Vinter (2006) a comparé l'écriture d'enfants âgés de 8, 9 et 10 ans qui écrivaient des lettres isolées avec et sans vision. Les auteurs ont observé que l'absence de vision modifiait de nombreux paramètres de l'écriture chez des enfants (taille des lettres, vitesse, fluidité et pression) alors que chez les adultes, seule la pression augmentait. Donc pendant l'étape d'automatisation de l'écriture jusqu'à 10 ans, les enfants ont besoin d'un retour visuel. Comme le disent Chartrel et Vinter (2004), « C'est l'œil qui va dicter à la main là où elle doit aller ».

Dans le domaine des neurosciences du mouvement, Wolpert et collaborateur ont participé au développement de la théorie des modèles internes (Wolpert et coll., 1995 ; Wolpert et coll., 1998 ; Wolpert & Ghahramani, 2000). Dans cette théorie, le mouvement volontaire est contrôlé par trois modèles internes, qui simulent des états simplifiés du système. Un premier modèle dit « inverse » permet de générer la commande motrice en fonction de l'état actuel du système, du contexte et de la tâche. Le second modèle, appelé « direct dynamique », prédit l'état du système suite à l'émission de cette commande à partir d'une copie d'efférence de la commande motrice. Enfin, le troisième modèle, dit « direct sensoriel » correspond à la prédiction des conséquences sensorielles de cet état (Wolpert & Ghahramani, 2000). En comparant la sortie sensorielle prédite à la sortie sensorielle réelle, le système peut corriger la commande motrice associée à l'état suivant. Le contrôle ici est donc rétroactif, réalisé après l'action. L'apprentissage va consister à apprendre un modèle inverse permettant de générer les commandes motrices pour une série d'états désirés. Lorsque la commande motrice émise n'est pas bonne, on corrige les erreurs entre l'état désiré et estimé grâce à un contrôleur qui génère un retour qui s'ajoute à la commande motrice générée par le modèle inverse. En l'absence d'erreur, ce retour sur commande motrice est nul. Lorsque les liens entre les actions motrices et sensorielles sont intégrés, un contrôle proactif va pouvoir être mis en place, l'état actuel du système étant défini sur les retours sensoriels prédit par le modèle direct (voir figure 7).

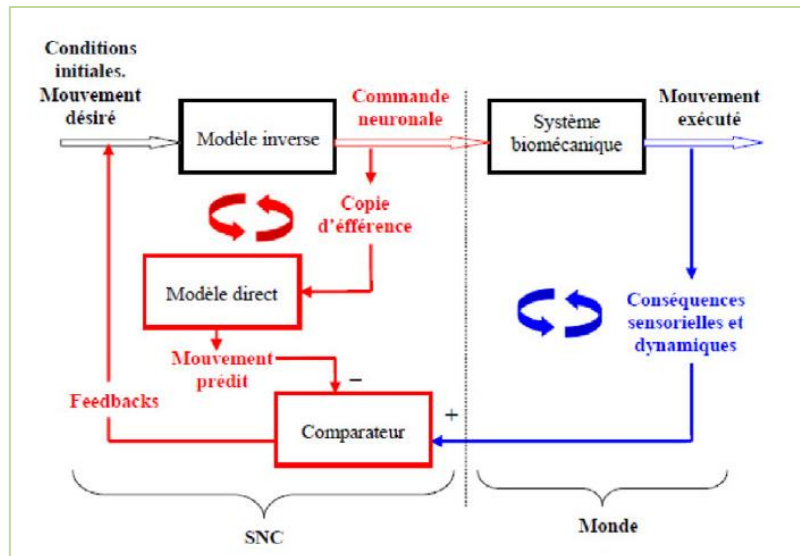


Figure 7 : Théorie des modèles interne (issue de Lebon et coll., 2013).

L'évolution de la cinématique de l'écriture traduit donc le passage d'une production visuo-motrice, sous un contrôle rétroactif visuel coûteux, à une production quasi-automatique basée sur un modèle interne et un contrôle proactif.

1.3.3. Une prise en compte des informations somesthésiques pendant l'écriture ?

En plus de la vision, l'écriture engage la somesthésie. La somesthésie (du grec ancien *soma* ; le corps et *aísthesis* ; la sensation) correspond aux informations sensorielles liées au toucher, mais également à la douleur et à la proprioception. Par souci de simplification, dans ce qui suit, nous emploierons le terme 'proprioception' ou 'retours proprioceptifs' dans un sens large qui englobera toutes les informations tactilo-kinesthésiques qui contribuent à la perception et au contrôle des mouvements de la main et des doigts.

L'importance des retours proprioceptifs en écriture n'a pas été beaucoup étudié, par rapport à l'impact du retour visuel qui est plus simple à supprimer expérimentalement. Cependant, certains auteurs ont comparé l'écriture de patients désafférentés (c'est à dire ayant perdu tout retour proprioceptif et cutané) à un groupe contrôle (Teasdale et coll.,

1993 ; Hepp-Reymond et coll., 2009). Teasdale et coll. (1993) ont observé que, chez ces patients, en l'absence de vision, la composante topocinétique est extrêmement perturbée. Celle-ci nécessite donc, en plus des informations visuelles, des informations proprioceptives (voir figure 8). Hepp-Reymond et coll. (2009) ont réalisé une étude comparable en enregistrant différentes variables cinématiques de l'écriture et ont montré que l'écriture chez le patient désafférenté était moins automatisée que celle des témoins, et ce même en présence de vision. Cela suggère que l'absence de retour proprioceptif perturbe l'automatisation des processus de l'écriture (Hepp-Reymond et coll., 2009).

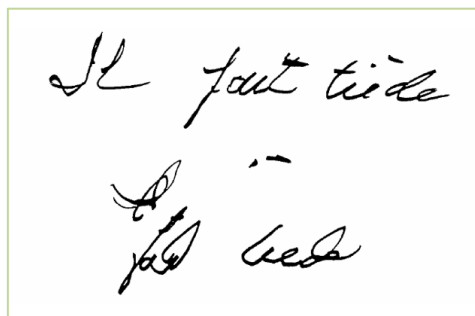


Figure 8 : Exemple de l'écriture de la phrase « Il fait tiède » par un patient désafférenté, yeux ouverts (en haut) et yeux fermés (en bas), extrait de Teasdale et coll. 1993.

L'existence d'une représentation proprioceptive des lettres peut être appuyée par les deux études suivantes. En faisant vibrer les tendons des muscles impliqués dans les mouvements du poignet, Roll et coll. (1995) ont induit une illusion de mouvement d'origine proprioceptive, dans laquelle les participants avaient l'impression de dessiner différentes formes géométriques (Roll & Gilhodes, 1995). Les retours proprioceptifs seraient donc associés à des formes et des directions. L'illusion d'écrire des lettres a également été créée chez un groupe de participants, en stimulant les tendons du poignet mais également de la cheville (Roll et coll., 2009). Ces deux expériences suggèrent donc que la représentation abstraite de chaque lettre peut être invoquée à partir d'un 'pattern' proprioceptif spécifique.

Les retours proprioceptifs ont également été étudiés dans le cadre de l'écriture numérique, en comparant l'écriture manuscrite sur une tablette avec un stylet et sur une

feuille avec un stylo, la feuille étant elle-même posée sur une tablette pour enregistrer les variables cinématique (Alamargot & Morin, 2015 ; Gerth et coll., 2016). L'écriture sur tablette graphique entraîne des différences cinématiques fines, notamment une accélération du geste et une augmentation de la taille des caractères produits (Alamargot & Morin, 2015 ; Gerth et coll., 2016; Guilbert et coll., 2019). L'accélération peut être expliquée par la friction entre le stylet et la tablette qui est plus faible que celle entre le stylo et le papier. Les enfants ayant appris à écrire sur papier, ils reproduisent les mêmes gestes sur tablette mais ils sont moins ralentis par les frottements sur le support. Parallèlement, l'augmentation de la taille des caractères produits sur la tablette, serait une stratégie pour augmenter les retours proprioceptifs. En apprenant à écrire, les enfants utilisent les informations visuelles et sensori-motrices pour produire les lettres et contrôler la trajectoire de leur geste. La tablette, dont la surface lisse diminue la friction par rapport au papier, modifie ce retour en réduisant la quantité d'information proprioceptive.

Il n'y a pas beaucoup d'études sur l'intégration des retours proprioceptif pendant l'apprentissage de l'écriture manuscrite. Comme nous l'avons dit, il ne serait pas utilisé chez les plus jeunes (Palmis et coll., 2017) et avec l'âge la pression exercée sur la feuille diminue (Chartrel & Vinter, 2006). A la différence de la vision, l'utilisation de ce retour sensoriel comme contrôle se ferait plus tardivement, avec l'automatisation du geste. L'enfant doit donc non plus se détacher de ce retour mais l'intégrer inconsciemment. Selon Danna et Velay (2015), favoriser l'intégration d'informations proprioceptives, comme la vitesse des déplacements du stylo pourrait permettre de mieux écrire. La sonification de la vitesse d'écriture peut permettre de donner un accès à ces informations (Danna & Velay, 2015).

Enfin, le rôle que peuvent jouer les récepteurs tactiles sensibles à la pression des doigts en contact avec le stylo n'est pas encore connu, mais une meilleure perception tactile serait associée à une meilleure qualité d'écriture chez les enfants (Yu et coll., 2012). Des auteurs ont montré que la pression excessive des récepteurs tactiles réduisait la transmission de l'information tactile (Fabre et coll., 2021). Dans une tâche de production

graphique (tracer le signe infini sur un modèle en continu pendant 15 secondes), la suppression des doigts sur le stylo entraînait un traçage moins précis, montrant l'importance des informations afférentes issues des récepteurs cutanés (Danna et coll., 2021).

1.3.4. Modèle de l'écriture manuscrite chez l'expert

Comment les lettres sont-elles produites pendant l'écriture manuscrite et sur quelles représentations s'appuient-elles ?

1.3.4.1. Niveau de traitements/représentations de l'écriture des lettres

La production écrite des lettres a été étudiée selon deux aspects : des aspects linguistiques, ou centraux (notamment orthographiques : comment retrouve-t-on les lettres d'un mot) et des aspects moteurs (comment produit-on ces lettres ?). Les processus orthographiques ne sont pas au cœur de ce travail de thèse, mais nous allons les évoquer brièvement. Comme pour les modèles de la lecture, une conception en double voie a été proposée (Bonin et coll., 2001 ; Ellis, 1982 ; Rapp & Fischer-Baum, 2015). Les lettres pourraient être retrouvées selon deux voies : une voie lexicale directe, retrouvant les lettres à partir d'une représentation orthographique des mots apprises et stockées en mémoire à long terme et par un processus de conversion des sons en lettres (Bonin et coll., 2001, 2015 ; Ellis, 1982 ; Rapp & Fischer-Baum, 2015).

Les modèles de production écrite proposent que, pendant l'écriture, les lettres à produire sont activées dans une mémoire à court terme appelée initialement un buffer graphémique (Ellis, 1982) ou buffer orthographique (Margolin, 1984, voir figure 9). L'activation des lettres dans cette mémoire à court terme se ferait au niveau du mot. Les mots ne seraient pas représentés par une chaîne de lettres mais par l'identité des lettres, leur nombre (la présence de lettres doublées) et leur ordre. À ce niveau de traitement, les auteurs s'intéressant à la production d'écriture parlent de graphème (la plus petite unité

du langage écrit, soit les lettres dans les systèmes alphabétiques). Les graphèmes représentant les lettres sont représentés d'une manière abstraite, pouvant par la suite être écrites dans différentes casses ou styles, à la main ou au clavier, mais également épelées oralement (Bonin et coll., 2001 ; Ellis, 1982 ; Rapp & Fischer-Baum, 2015). Cette représentation pourrait donc être commune dans l'écriture et dans la lecture (Wiley & Rapp, 2021 ; Wong et coll., 2018). Kandel, (in press.) propose que cette mémoire à court terme ne représenterait pas seulement les graphèmes mais également d'autres tailles d'unités (morphème, syllabe).

Les graphèmes à écrire peuvent être produits sous différents allographes. Comme nous l'avons décrit précédemment, les allographes correspondent aux différentes formes spatiales du graphème (Ellis, 1982, 1988 ; Thomassen & van Galen, 1992 ; van Galen, 1991). Selon Ellis (1982) et Bonin et coll., (2015), les processus peuvent être définis en 3 niveaux de représentation : le niveau graphémique (codant l'identité abstraite des lettres), le niveau allographique (codant l'identité et le style d'écriture) et le niveau moteur (codant les patrons moteurs des allographes ; figure 9). Au contraire, selon van Galen (1991) la sélection d'un code allographique précisant le style d'écriture voulu permettrait d'activer directement le patron moteur correspondant dans une mémoire motrice, sans passer par une représentation intermédiaire.

Toujours selon van Galen (1991) le mode d'écriture en cours pourrait pré-activer le répertoire allographique adéquat qui serait ensuite utilisé pour effectuer l'association du graphème au patron moteur approprié. Ellis (1982) décrit que la sélection allographique dépendrait aussi de règles « orthographiques » (comme la majuscule en début de phrase ou en début de nom propre), mais également de la position de l'allographe dans le mot et de l'allographe qui lui précède (par exemple, il rapporte la tendance à écrire le s script au début de mot et le s cursif à la fin). Ces observations sur la sélection allographique ont été faites sur l'alphabet latin.

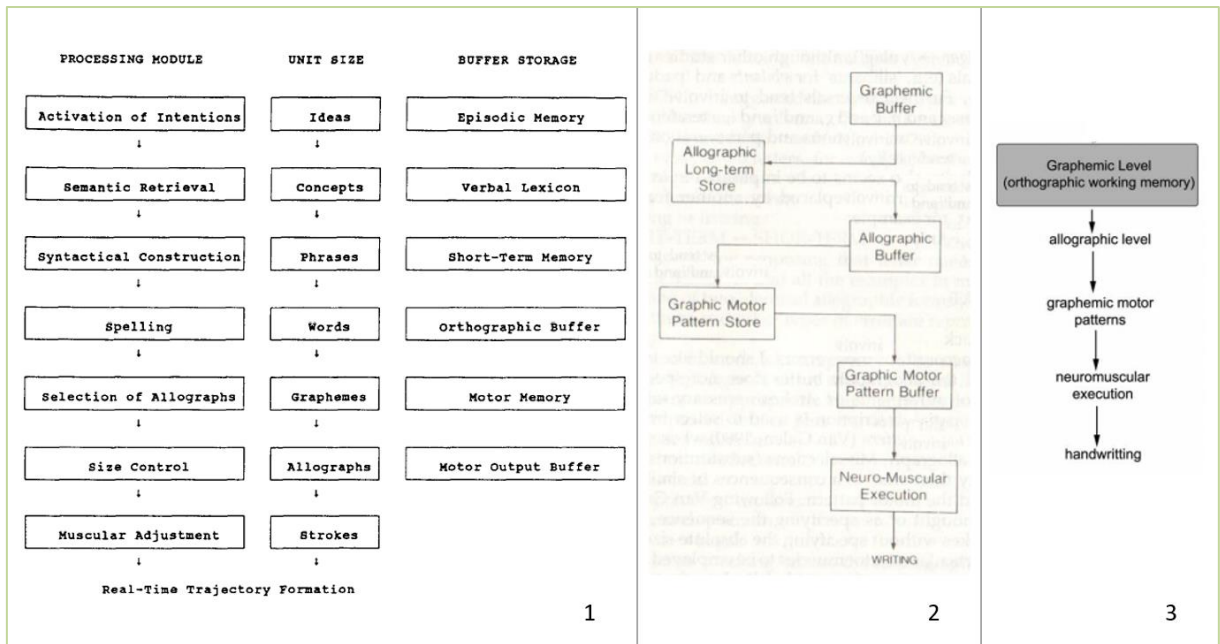


Figure 9 : Modèle de la production d'écriture manuscrite. A. Extrait de Van Galen, 1991. B. Extrait de Ellis, 1982. C. Zoom sur les processus périphérique, extrait de Bonin, et coll. 2015.

1.3.4.2. Production motrice de l'écriture manuscrite

Une fois le patron moteur activé, il va y avoir un ajustement des codes du patron moteur en fonction de différents paramètres : tout d'abord en fonction de la taille de la production et cet ajustement se fait au niveau de la lettre, indépendamment de l'effecteur (van Galen, 1991; et de la vitesse : (Kandel, in press. ; Pick & Teulings, 1983) puis un ajustement en fonction du groupe musculaire à utiliser, qui se fait au niveau du trait (Margolin, 1984; van Galen, 1991). Récemment, Kandel, (in press), regroupe les processus post-patron moteur en global (ajustement au niveau de la lettre) et local (ajustement au niveau du trait).

Ces codes sont ensuite convertis en commandes motrices qui permettent de réaliser les mouvements, en fonction du contexte biophysique (Margolin, 1984 ; Van Galen, 1991). Selon la théorie cinématique des gestes rapides (Plamondon, 1995a, 1995b), les mouvements d'écriture peuvent être décomposés en segments, ou vecteurs de vitesse qui sont définis par leur amplitude et leur trajectoire (Plamondon et coll., 2014). D'un point de vue physiologique, les aires motrices secondaires (cortex prémoteur et aire motrice

supplémentaire) spécifient la séquence musculaire à réaliser puis transmettent l'information au cortex primaire selon l'effecteur et la somatotopie. Les neurones du cortex primaire vont exciter des motoneurones et interneurones du tronc cérébral et de la moelle épinière. Enfin, l'activité des motoneurones commande la contraction de faisceaux de fibres musculaires (Plamondon, 1995a). Ces étapes, ainsi que le fonctionnement d'un motoneurone, sont décrites sur la figure 10.1.

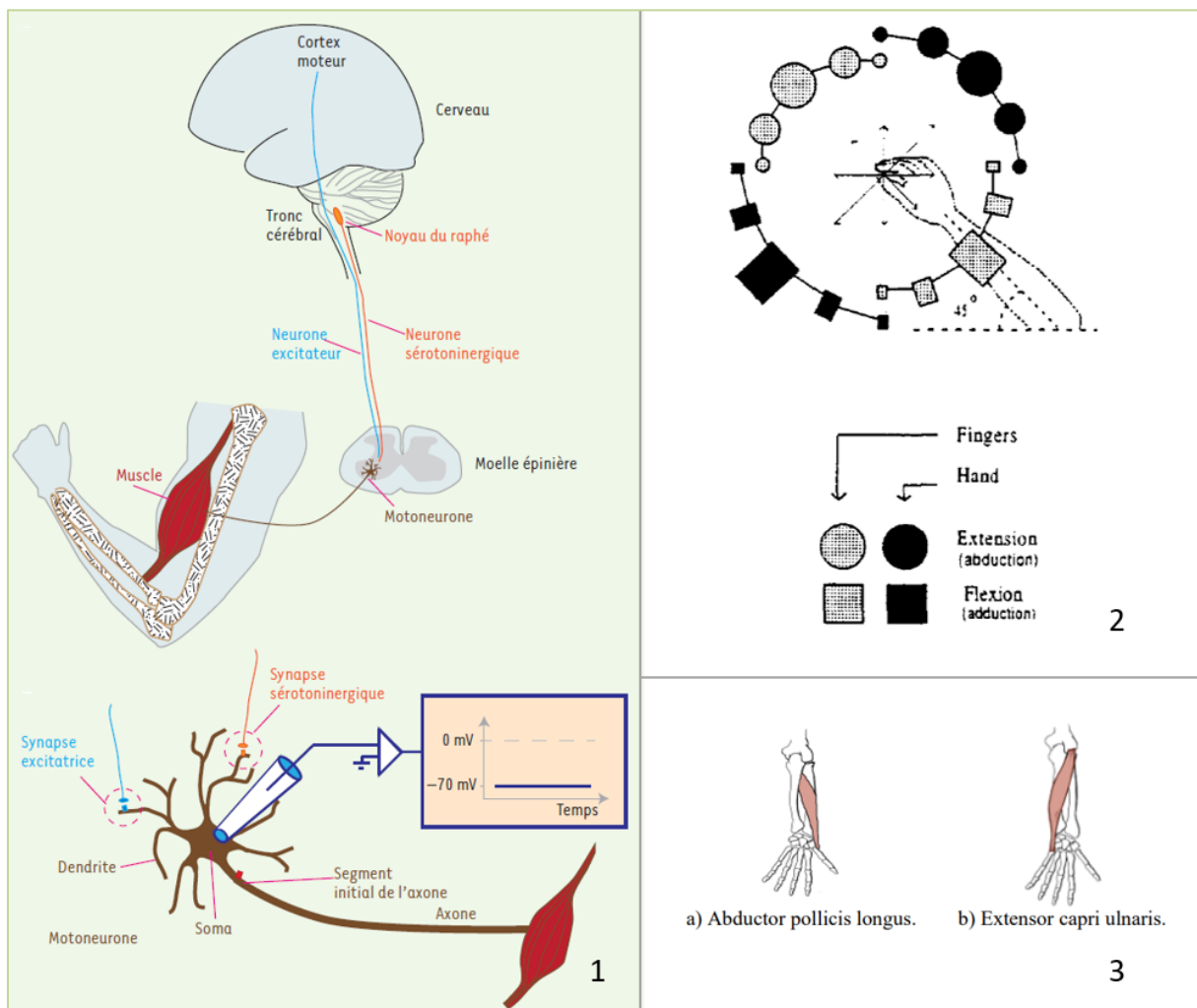


Figure 10 : 1. Organisation du système moteur et d'un motoneurone (extrait de Perrier, 2013).
 2. Modèle simplifié de l'implication de la main et du poignet dans les différents mouvements (extrait de Meulenbroek & Thomassen, 1991).
 3. Muscles de l'avant-bras impliqués dans les mouvements verticaux (a) et horizontaux (b) (extrait de Chihi et coll., 2017).

Les mouvements de l'écriture manuscrite sont en général réalisés par l'action combinée de muscles distaux, de l'avant-bras, de la main et des doigts, bien que les muscles proximaux (de l'épaule et du bras) jouent également un rôle stabilisateur pendant l'écriture (Linderman et coll., 2009). Bien que les mouvements soient réalisés à partir de synergies d'un ensemble de nombreux muscles, certains auteurs ont cherché à comprendre comment les différents muscles étaient impliqués dans l'écriture. Selon van Galen (1991), les mouvements dans le sens horizontal (traits ou déplacement de la main selon l'axe d'écriture) sont réalisés par l'adduction et l'abduction du poignet, alors que les traits verticaux ou les traits courbes sont reliés à la flexion et l'extension des doigts. Selon Meulenbroek et Thomassen (1991, voir figure 10.2), les mouvements horizontaux vers la droite sont produits par une extension de la main et une flexion des doigts et ceux vers la gauche par une flexion de la main et une extension des doigts. Au niveau de l'avant-bras le muscle abducteur de l'avant-bras (*pollicis longus*) est responsable des mouvements verticaux et l'extenseur (*capri ulnaris*) des mouvements horizontaux (voir figure 10.3; Chihi et coll., 2017). Comme nous le verrons par la suite, certaines variables comme le sens d'écriture d'un système graphique vont entraîner des directions préférentielles dans les mouvements d'écriture.

1.3.5. Apprentissage de la frappe au clavier

Nous ne disposons que de peu de description de l'évolution de la dactylographie chez l'enfant pour plusieurs raisons : d'abord, la pratique de la frappe au clavier est beaucoup plus récente que celle de l'écriture manuscrite, ensuite son enseignement n'est pas aussi généralisé et enfin, jusqu'à aujourd'hui, ce sont essentiellement les adultes qui l'apprennent, le plus souvent en dehors de tout contexte éducatif, donc sans apprentissage formel. Comme nous allons le voir dans cette partie, l'écriture au clavier diffère de l'écriture manuscrite par de nombreux aspects que nous verrons successivement (Velay, et coll., 2004). Une des différences majeures entre les deux modes d'écriture concerne les mouvements réalisés.

1.3.5.1. Nature des mouvements et représentation interne

L'écriture manuscrite est uni-manuelle et, même si la main non dominante peut servir à maintenir la feuille, une seule main exécute les mouvements permettant de produire les lettres. L'écriture au clavier présente, elle, une propriété bimanuelle où chaque main évolue dans une partie du clavier (Velay et coll., 2004). De plus, les doigts travaillent en synergie dans l'écriture manuscrite, pour déplacer la pointe du stylo sur la feuille alors que dans l'écriture au clavier, les doigts ont des buts indépendants. Enfin, dans l'écriture au clavier, les mains ne tiennent pas d'instrument scripteur, elles sont « libres ».

Dans l'écriture au clavier, les doigts sont presque constamment en mouvement et ils peuvent commencer à se déplacer vers leur cible plusieurs lettres avant celle qu'ils doivent produire (Shaffer, 1975 ; Rumelhart & Norman, 1982). En 1982, Rumelhart et Norman ont mesuré les IKIs (Inter-Keystroke-Interval, c'est-à-dire le temps entre deux frappes successives) et ont montré que les IKIs étaient plus courts lorsqu'ils faisaient intervenir deux effecteurs différents, montrant une anticipation du mouvement. Ils ont également pu voir que lorsque le bigramme (c'est-à-dire deux lettres successives) était tapé par le même doigt, l'IKI dépendait de la distance entre les deux touches (Rumelhart & Norman, 1982). L'ensemble des frappes composant le mot sont activées simultanément (Rumelhart & Norman, 1982 ; Logan, 2003 ; Logan & Crump, 2011). Les appuis sur chaque touche sont bien évidemment sériels mais le déplacement des doigts vers les touches peut être anticipé.

La nature des représentations internes acquises pendant cet apprentissage va être extrêmement différente de celle de l'écriture manuscrite. Dans l'écriture manuscrite, à chaque lettre correspond un patron moteur permettant de spécifier les différents mouvements à réaliser pour produire les traits composant la lettre (van Galen, 1991). Dans l'écriture au clavier, l'écriture d'une lettre correspond à l'appui d'une touche à la suite d'un mouvement de pointage vers cette touche. Le mouvement n'est donc pas spécifique à la forme spatiale de la lettre, « un même geste peut faire accéder à plusieurs lettres et une même lettre peut être accédée par différents mouvements » (Velay et coll., 2004). En effet, il existe une infinité de combinaison de la position de la main et des doigts

pouvant permettre d'atteindre une touche (Rumelhart & Norman, 1982). Selon Rumelhart et Norman (1982), qui a tenté de modéliser la frappe chez les dactylographes experts, chaque lettre est associée à un « schéma de frappe » qui spécifie le doigt et la position cible dans un système de coordonnées dont la référence est le clavier. Selon Logan (2011), l'effecteur et la localisation de la touche sont effectivement encodés pendant la préparation du mouvement, mais les deux sont sélectionnés séparément (contrairement à la méthode des dactylographes experts (Logan, 2018). Curieusement, des auteurs ont montré qu'il était difficile pour des experts, tapant pourtant plus de 70 mots à la minute (donc connaissant la position des touches), de se rappeler de la position des lettres sur le clavier (Snyder et coll., 2014 ; Logan & Crump, 2009 ; Liu et coll., 2010). Au clavier, l'unité de la production motrice est donc la lettre, alors qu'en écriture manuscrite c'est le trait (van Galen, 1991). Il n'y a donc pas d'information spatiale sur la forme visuelle de la lettre dans la représentation créée par l'écriture au clavier. De plus, il n'y a pas d'information sur l'allographe.

La sélection allographique décrite dans l'écriture manuscrite diffère de celle du clavier. Au clavier, la même touche correspond à tous les allographes d'une lettre, alors qu'au contraire, dans l'écriture manuscrite, chaque allographe possède son propre patron moteur. Sur les claviers latins, la casse se spécifie à l'aide de l'appui d'une touche supplémentaire (flèche vers le haut). Comme nous le verrons par la suite, dans le clavier arabe la sélection de l'allographe correct est réalisée par l'ordinateur, la même touche va donner différents allographes en fonction du contexte (la lettre précédente et la suivante).

Comme pour l'écriture manuscrite, l'apprentissage de l'écriture au clavier consiste à passer d'un processus très coûteux en ressource attentionnelle et sous contrôle visuel strict, à un processus automatisé, sous contrôle proprioceptif (Cooper, 1983 ; Logan, 2018).

Lorsqu'on commence à écrire au clavier, il faut décomposer les mots en lettres et les rechercher visuellement, une par une (Logan, 2018). Selon Logan, à cette étape la mémoire de travail est fortement sollicitée alors que le système moteur ne l'est pas. En effet, il faut sélectionner un effecteur et réaliser une tâche de pointage vers la touche (Logan, 2018 ; figure 11). Le mouvement est suivi par un contrôle visuel a posteriori sur

l'écran pour vérifier le résultat de son action. Les lettres sont donc tapées de façon sérielle, avec de longs intervalles inter-frappe (IKI). Certains auteurs appellent cette étape la phase cognitive (Preminger et coll., 2004 ; Sormunen, 1993), soulignant sa forte demande cognitive. Avec l'entraînement, l'apprenant mémorise la localisation des touches sur le clavier (et l'association avec un doigt selon Rumelhart & Norman (1982)). Du point de vue moteur, avec l'entraînement, les mouvements des doigts deviennent moins séquentiels et plus simultanés (Gentner, 1983) . L'augmentation du nombre de doigts impliqué dans la frappe augmente la charge de travail du système moteur mais décharge la mémoire de travail (figure 11).

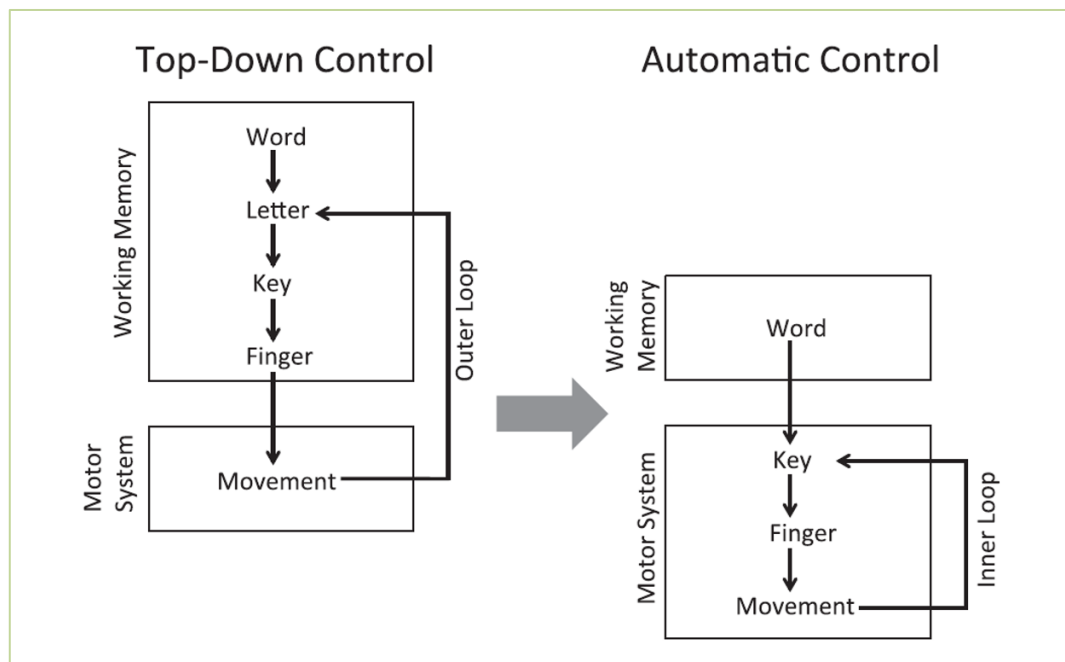


Figure 11 : Modèles de la frappe sous contrôle « top-down » et sous contrôle automatique, extrait de Logan (2018).

Comme nous l'avons précisé au début de cette partie, cette description a été faite chez des personnes maîtrisant déjà l'écriture manuscrite (et plus largement la lecture).

Aujourd'hui, l'utilisation d'un clavier se fait de plus en plus jeune, une enquête récente² montre que 30% des enfants de 3 à 6 ans possèdent leur propre outil numérique (tablette, smartphone, console de jeux ou une télévision), dont certains nécessitent d'écrire au clavier. Comment se fait l'apprentissage au clavier à cet âge où l'enfant ne maîtrise pas encore complètement l'écriture manuscrite ? Chez les enfants en cours d'apprentissage de l'écriture, l'écriture au clavier pourrait être plus simple car reconnaître visuellement sur le clavier la lettre à produire est plus facile que retrouver et activer une représentation mentale interne, comme c'est le cas dans l'écriture manuscrite (Spilling et coll., 2021). Cependant, la présentation simultanée de l'ensemble des lettres sur le clavier, dont toutes sauf une (la lettre à produire) sont inappropriées, pourrait également avoir un coût (Spilling et coll., 2021).

1.3.5.2. Les retours visuels dans l'écriture au clavier et le partage attentionnel

Les différences entre écriture manuscrite et écriture au clavier en ce qui concerne le traitement des informations visuelles sont considérables (Velay et coll., 2004). Dans l'écriture manuscrite, toute l'information visuelle à traiter, à la fois sur la trace produite et sur le mouvement de la main et des doigts, est limitée à une toute petite zone de l'espace, à l'extrémité du stylo où surgit l'encre qui imprime le papier. Au clavier, au contraire, il faut distinguer deux espaces séparés : l'espace 'perceptif', l'écran où on lit ce qui est frappé, et l'espace 'moteur', le clavier où les doigts actionnent les touches.

Il y a donc un partage spatial et attentionnel au clavier qui devrait a priori être préjudiciable à une écriture rapide. C'est la raison pour laquelle, chez le dactylographe expert, l'information visuelle à traiter ne doit concerner exclusivement ou presque que l'écran, pour contrôler que le texte produit correspond bien à ce qui était programmé. Donc, chez l'expert, le seul retour visuel traité est rétroactif, et linguistique sur les mots

² Rapport de l'OPEN (Observatoire de la Parentalité et de l'Education Numérique), l'UNAF (Union Nationale des Associations Familiales), et Médiamétrie sur 2087 parents d'enfants âgés de 0 à 14 ans en 2020.

écrits (et non sur le mouvement en cours d'exécution). Dans l'écriture manuscrite, le retour visuel est important pour les aspects topocinétiques, mais moins, voire pas, pour les aspects morphocinétiques (Paillard, 1990). Au clavier, comme les lettres apparaissent d'un seul coup dans leur entièreté, la forme des lettres (morphocinétique) et les positions relatives des éléments des lettres et des lettres entre elles (topocinétique) ne sont plus pertinentes car elles sont prises en charge par la machine et le traitement de texte associé. De plus, dans l'écriture manuscrite, les lettres se forment sur la feuille de façon dynamique, en fonction des mouvements produits, ce qui n'est pas le cas au clavier.

Comme pour l'écriture manuscrite, l'apprentissage de l'écriture au clavier va se faire en impliquant fortement le système visuel. Avant de produire l'action, en recherchant visuellement la lettre sur le clavier, et après avoir produit l'action, en vérifiant visuellement la lettre qui s'affiche à l'écran. Que ça soit à la main ou au clavier, chez l'adulte, l'écriture des lettres est donc possible sans retour visuel, suggérant un mouvement automatique programmé en interne. Avec l'internalisation d'une représentation motrice, l'apprenant se détache du retour visuel. A la main, l'apprenant internalise l'aspect morphocinétique des lettres, au clavier il internalise le mouvement qui permet d'attendre une lettre donnée sur le clavier.

1.3.5.3. Retours proprioceptifs et tactiles dans l'écriture au clavier

Dans l'écriture au clavier, deux courants s'opposent concernant l'intégration des retours sensoriels chez l'expert. Selon Rumelhart et Norman (1982), la frappe chez les experts ne nécessite pas de retours proprioceptifs ou tactiles. Chez eux, l'appui d'une touche entraîne automatiquement la désactivation du schéma de frappe qui a permis de la produire. Ce modèle fonctionne donc en l'absence de retours sensoriels, ce qui peut se justifier par le fait qu'il a été développé pour simuler la frappe chez des dactylographes experts.

Au contraire, Logan & Crump (2011) décomposent la frappe chez l'expert en deux boucles : la boucle externe (BE) et la boucle interne (BI). La BE génère les chaînes de mots à produire et les passe un par un dans la BI. La BI est encapsulée dans la BE. A partir du mot, la BI transcrit chaque lettre en frappe et maintient l'ordre de ces frappes. A la

différence de Rumelhart et Norman (1982), la BI réalise et contrôle les mouvements des doigts en fonction des retours kinesthésiques et tactiles (Logan & Crump, 2011). L'action conjointe et simultanée des deux mains et des différents doigts dans la frappe au clavier engage un fort contrôle moteur pour maintenir l'ordre des frappes à produire. La plupart des erreurs de frappe observées par Rumelhart et Norman (1982) concernent en effet un problème d'ordination ou d'anticipation et des erreurs de transposition (inversion de deux lettres successives), donc des difficultés à maintenir l'ordre des frappes qui sont anticipées.

Une étude intéressante de Crump & Logan (2010) a été consacrée à l'importance de l'information tactile issue du clavier. Les auteurs ont fait copier des mots et des paragraphes à des experts, sur différents types de claviers : normal, déconstruit (ou les touches étaient enlevées mais gardant la sensation de résistance des touches) et un clavier projeté par un laser sur une surface plane (sans sensation d'appui). Les auteurs ont montré que les IKIs et les taux d'erreurs étaient fortement impactés par les claviers testés. Pour s'assurer que cet effet ne venait pas d'un problème d'habitation, dans une seconde étude, les participants réalisaient la même tâche sur le clavier laser mais pendant 400 essais. Les auteurs n'ont pas observé d'amélioration, dans les IKIs, ou dans les taux d'erreurs, en fonction des essais. Cette étude démontre donc l'importance de sentir les touches pendant la frappe. Cependant, aujourd'hui les claviers virtuels sont de plus en plus utilisés (sur tablette ou smartphone). Confirmant les observations de Crump & Logan (2010) des études ont montré que l'écriture sur clavier virtuel était plus lente que l'écriture sur un clavier physique (Chaparro et coll., 2014 ; Armstrong & Wilkinson, 2016).

1.3.6. Régions cérébrales impliquées dans l'écriture manuscrite

Pendant ce travail de thèse, nous avons pu réaliser une revue de question sur les bases cérébrales de l'écriture. La partie qui suit est extraite de l'article « Bases cérébrales de l'écriture : orthographe et contrôle moteur de la production » publiée par Palmis, S. Fabiani, E. et Longcamp, M. (2019) dans la revue de neuropsychologie (DOI : 10.1684/nrp.2019.0514).

Les régions cérébrales impliquées dans l'écriture sont aujourd'hui distinguées en deux catégories : les régions impliquées dans le rappel de l'orthographe et celles impliquées dans la production du geste (Planton et coll., 2013 ; Purcell et coll., 2011a). Les régions sous-tendant l'orthographe sont supposées communes pour les différentes modalités d'écriture (manuscrit et au clavier), et sont localisées dans le gyrus fusiforme gauche et dans le gyrus frontal inférieur gauche (voir figure 12). Dans cette partie nous présentons plus spécifiquement les régions impliquées dans la composante motrice de l'écriture manuscrite.

Des cas de dysgraphies apraxiques pures sont relevés chez des patients qui ont spécifiquement perdu la capacité de former les lettres (Anderson et coll., 1990) et laissent supposer que certaines parties du cerveau codent spécifiquement les patterns moteurs graphiques. Mais est-ce vraiment réaliste ? Une explication possible est que certains groupes neuronaux, initialement impliqués dans les transformations visuomotrices et la programmation des mouvements de la main, se spécialisent dans la production écrite sous l'impulsion d'un apprentissage précoce, long et intensif (sachant que l'expertise motrice a un effet important sur le fonctionnement et la structure du système nerveux central, Palmis et coll., 2017).

La plupart des lésions responsables des dysgraphies apraxiques sont localisées dans le lobe pariétal postérieur gauche ou dans le lobe frontal gauche chez les sujets droitiers (Rapcsak & Beeson, 2015). Des dysgraphies apraxiques ont également été rapportées à la suite de lésions cérébelleuses (Marien et coll., 2007), et plus rarement dans d'autres régions. Les connaissances issues de l'imagerie cérébrale (principalement IRMf) confirment largement ces données cliniques. Par exemple, la figure xx représente l'augmentation du signal BOLD projetée sur le cerveau d'un jeune adulte droitier impliqué dans une tâche d'écriture de mots (Palmis et coll., 2021). Le réseau impliqué est composé de plusieurs régions spécifiques, identifiées par ailleurs dans les études de neuropsychologie clinique et de neuroimagerie (Planton et coll., 2013).

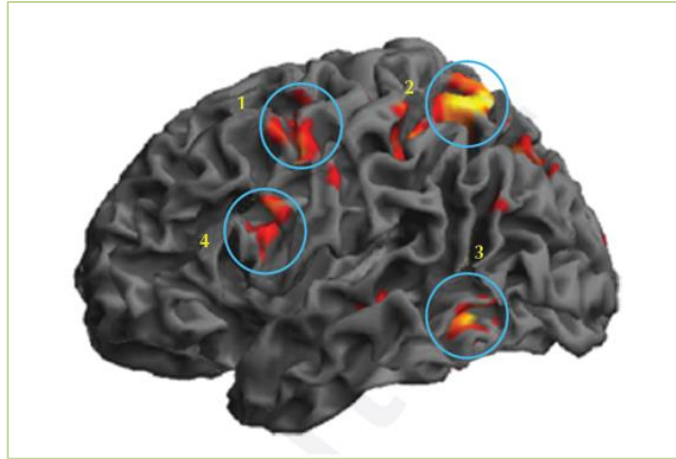


Figure 12 : Hémisphère gauche d'un individu représentatif d'un groupe de jeunes adultes pendant l'écriture manuscrite de mots par rapport à une tâche de tracé de boucles. On y retrouve les éléments clés du réseau : cortex prémoteur dorsal (1) ; cortex pariétal supérieur (2) ; gyrus fusiforme (3) ; gyrus frontal inférieur/cortex prémoteur ventral (4). Le cervelet droit, très impliqué également, n'est pas représenté. Les régions 3 et 4 sous-tendent les processus centraux. Elles sont donc impliquées également dans la dactylographie. Les régions 1 et 2, et le cervelet droit, sous-tendent les processus périphériques.

L'une des régions les plus étudiées de ce réseau est l'aire dite « d'Exner », dans le cortex prémoteur dorsal (PMD) gauche, située à la jonction du sillon frontal supérieur et du gyrus précentral (Planton et coll., 2013). Des lésions très circonscrites de cette région peuvent induire des dysgraphies pures (Anderson et coll., 1990). De même, la stimulation de cette même région provoque des symptômes de dysgraphie pure, marquée par une déformation des graphèmes, une lenteur et même des « arrêts » de l'écriture (Roux et coll., 2009). Roux et col. (2009) ont également recueilli des données IRMf chez des sujets sains dans une tâche d'écriture sous dictée de mots. Leur analyse a confirmé l'implication du cortex prémoteur dorsal dans cette tâche. Sur cette base, ces mêmes auteurs (Roux et coll., 2009) ont émis l'hypothèse du rôle d'interface que pourrait jouer région, nommée GMFA (aire graphémique motrice frontale), entre les représentations orthographiques et les programmes moteurs. La spécificité fonctionnelle de cette région pour l'écriture de symboles linguistiques a été confirmée par l'une de nos études en IRMf dans laquelle nous avons démontré que cette région s'active préférentiellement pour l'écriture des lettres, par rapport à d'autres formes graphiques comme les chiffres (Longcamp et coll., 2014).

Les régions pariétales supérieure gauche et cérébelleuse droite sont également systématiquement impliquées (Planton et coll., 2013). Le lobule pariétal supérieur (SPL)

est une région motrice de haut niveau, massivement interconnectée avec les aires motrices frontales. Des données électrophysiologiques montrent que les neurones de cette région déchargent lorsque des objets sont saisis ou manipulés dans l'espace. Au cours d'une tâche d'écriture, la stimulation corticale de cette région chez des patients opérés pour une résection tumorale génère tout à la fois des erreurs graphomotrices et des erreurs orthographiques (Magrassi et coll., 2010). Pour Magrassi et col. (2010), le lobule pariétal supérieur se trouve donc dans une position et état de connectivité idéale, pour interagir avec les réseaux contrôlant le langage et les gestes complexes de la main dans l'espace. Quant au cervelet, il joue un rôle majeur dans l'apprentissage et la rétention des habiletés motrices (Doyon & Benali, 2005). Pour certains auteurs, il mettrait en œuvre des modèles internes, qui permettent à la fois la correction des erreurs en cours d'acquisition d'une habileté et le contrôle d'un mouvement automatisé (Manto et coll., 2012). L'implication systématique du cervelet droit dans l'écriture pourrait donc être liée à un rôle initial dans les premières étapes de l'acquisition (Doyon & Benali, 2005) et, par la suite, dans la rétention des habiletés graphomotrices acquises.

On peut penser que l'ensemble de ce réseau moteur (PMD et SPL gauches ainsi que cervelet droit), dédié au contrôle de la main dominante, acquiert un rôle majeur et systématique dans l'écriture à la suite de la pratique du geste dès le plus jeune âge. Nous avons récemment démontré que l'activité de ce réseau moteur est coordonnée à celle des régions orthographiques décrites plus haut au cours de l'écriture manuscrite de mots (Palmis et coll., 2019b).

1.3.7. Régions cérébrales impliquées dans l'écriture au clavier

Cette partie est également extraite de l'article « Base cérébrale de l'écriture au clavier, par Palmis, S., Fabiani, E. et Longcamp, M. (2019) dans la revue de neuropsychologie (DOI : 10.1684/nrp.2019.0514).

Comme nous l'avons mentionné plus haut, les modèles cognitifs de la production écrite postulent que les processus centraux de l'écriture sont communs à toutes les tâches d'écriture (Rapp & Fischer-Baum, 2015). En effet, Purcell et col. (2011b) ont mis en évidence des activations frontales inférieures et fusiformes gauches dans une tâche de frappe de mots. Cependant, sur le plan moteur, il est légitime de se demander si un réseau radicalement différent n'interviendrait pas pour programmer les frappes correspondant à un mot. Si certains auteurs rapportent des cas où l'écriture manuscrite et la dactylographie sont atteintes de manière parallèle (Manto et coll., 2012), il existe quelques observations de dysgraphie touchant plus sélectivement la frappe au clavier chez des sujets pourtant experts (Cook et coll., 2013; Otsuki et coll., 2002; Ryu et coll., 2012), on parle de dystypie. Des cas de dystypie ont été rapportés suite à des lésions proches de l'aire du PMd (Otsuki et coll., 2002; Ryu et coll., 2012), mais également de lésion pariétale (Magrassi et coll., 2010) ou encore temporopariétale (Cook et coll., 2013). L'existence de troubles spécifiques à la dactylographie conduirait à penser qu'une spécialisation fonctionnelle de certains réseaux neuronaux a été induite par l'apprentissage intensif de cette modalité d'écriture, ou par la pratique préférentielle d'un type d'écriture. Toutefois, la rareté et la diversité des lésions rapportés nous amènent à nuancer cette hypothèse.

Les données d'imagerie fonctionnelle actuelles semblent donc montrer que les réseaux qui sous-tendent la dactylographie et l'écriture manuscrite, par rapport à des tâches de contrôle impliquant des séquences motrices de complexité équivalente, ne sont pas fondamentalement différents (Gordon et coll., 1998 ; Higashiyama et coll., 2015 ; Purcell et coll., 2011b). Ces données remettent en question l'hypothèse de la spécificité fonctionnelle des réseaux neuronaux de l'écriture manuscrite. Les deux tâches ayant des fonctions proches et reposant sur des processus cognitifs en partie communs, il est possible que, chez des participants experts en dactylographie, le réseau cérébral qui se forme se distribue dans les mêmes régions que celui de l'écriture manuscrite. Ce réseau pourrait donc refléter la mise en œuvre de fonctions cognitives communes aux deux activités (mémoire de travail, articulation geste manuel/représentations linguistiques...). Pour certains auteurs, le réseau pariéto-frontal observé systématiquement dans les tâches d'écriture manuscrite et dactylographique entretiendrait un lien avec des

fonctions plus générales de mémoire de travail visuospatiale, d'attention et de planification motrice. Rapcsak & Beeson (2000) citent des études sur l'écriture manuscrite dans lesquelles des effets liés à la mémoire de travail ont été rapportés dans le PMD et dans le cortex pariétal supérieur (Purcell et coll., 2011a ; Rapp & Dufor, 2011). Selon ces auteurs, les activations observées dans l'écriture manuscrite sous-tendraient des opérations cognitives plus générales, nécessaires à la construction d'une carte de l'espace servant à transformer des représentations mentales internes en actions visuomotrices. En effet, l'écriture manuscrite relève davantage d'un comportement visuomoteur impliquant à la fois la mémoire de travail et des transformations visuomotrices. Bien que les activations mesurées dans des tâches d'attention spatiale, de mémoire de travail visuospatiale et de planification motrice soient distribuées différemment, Ikkai et col. (2011) ont montré qu'elles se superposent dans plusieurs régions, en particulier dans le sillon intrapariétal et le PMD. Selon Rapcsak & Beeson (2000), ceci expliquerait la proximité des réseaux de l'écriture manuscrite et de la dactylographie (Rapcsak & Beeson, 2000).

Une autre caractéristique importante de la dactylographie est sa nature séquentielle. Dès le départ, les études comportementales ont insisté sur le fait que plusieurs caractéristiques observables de la frappe au clavier sont présentes en raison du fait que la préparation des différentes lettres se réalise en parallèle, une frappe pouvant être anticipée par l'approche d'une main ou d'un doigt plusieurs frappes en amont (Logan & Crump, 2011 ; Rumelhart & Norman, 1982). Pinet et col. (2015) ont analysé les réponses neuronales évoquées par la préparation de la frappe d'un mot dans les cortex moteurs, avant le début de l'écriture de la première lettre. L'objectif était de mieux caractériser le déroulement temporel de l'activité de ces régions. Ils ont montré que l'amplitude de l'activation des cortex moteurs droit et gauche dépend de la distribution gauche/droite des touches sur le clavier au-delà de la première frappe : l'activation du cortex moteur contralatéral pour des mots réalisés en condition unimanuelle apparaît plus ample que pour les mots réalisés en condition bimanuelle. Dans cette dernière condition, l'activation diminue proportionnellement au nombre de lettres traitées par la main ipsilatérale (Pinet et coll., 2015). Cela confirme qu'au niveau des circuits cérébraux qui codent les mouvements manuels, les différentes frappes sont programmées avant même la frappe de la première

lettre. Cela souligne aussi une caractéristique spécifique à la dactylographie qui relève de l'équilibre qui doit se faire entre l'activation du cortex moteur controlatéral et l'inhibition du cortex moteur ipsilatéral au cours de la séquence de frappes. La rupture de cet équilibre peut induire des troubles spécifiques à cette modalité de production écrite.

Synthèse intermédiaire

Dans ce premier chapitre nous avons présenté comment l'enfant apprend la forme visuelle des lettres, les phonèmes associés et la sensori-motricité liée à leur écriture. Nous avons détaillé pourquoi les représentations sensori-motrices qui se mettent en place pendant l'apprentissage à la main et au clavier ne sont pas les mêmes. Nous avons également vu que ces représentations permettaient d'automatiser les processus de reconnaissance visuelle, d'association grapho-phonologique et d'écriture chez l'expert. Le plus souvent, ces trois aspects ont été traités séparément dans la littérature. Récemment, Wiley et Rapp (2021) et Wong et coll. (2018) ont proposé de modèles multimodaux des représentations des lettres (figure 13). Ces deux modèles sont très similaires mais, et c'est intéressant ici, celui de Wiley concerne les lettres arabes.

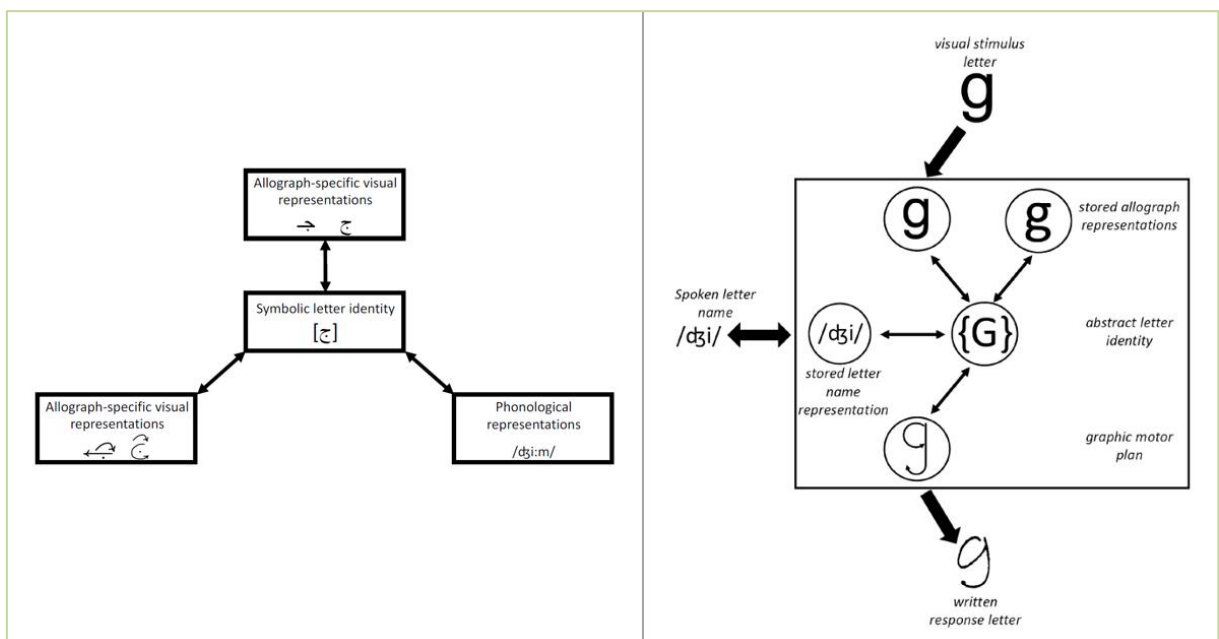


Figure 13 : Modèles de représentation multimodale des lettres, extraits de Wiley et Rapp, 2021 (gauche) et de Wong et coll., 2018 (droite). Ces modèles décomposent les lettres en représentation visuelle, phonologique (ou le nom de la lettre pour Wong et coll.) et motrice. Ces trois représentations sont liées entre elles par la représentation abstraite de la lettre.

De plus, depuis quelques dizaines d'années, le courant théorique de la 'cognition incarnée' s'est développé dans la communauté neuroscientifique et dans ce cadre conceptuel, il existerait des liens inter-modalitaires étroits dans les représentations cognitives, notamment entre la modalité visuelle et la sensori-motricité. Si ces liens sont avérés, apprendre les lettres à la main ou les apprendre au clavier pourrait entraîner des différences dans la représentation visuelle des lettres. Le second chapitre se décompose en deux parties. Nous commençons par apporter des arguments en faveur d'un effet de la motricité sur la perception des lettres, puis, nous présentons des études ayant directement comparé l'apprentissage des lettres à la main et au clavier.

2. Arguments en faveur d'une influence motrice dans la perception des lettres : Comparaison de l'apprentissage des lettres à la main et au clavier

2.1. Influence de la motricité sur la perception visuelle

Nous avons déjà rapidement discuté du fait que, dans le contexte biologique (et non dans les modélisations), le système visuel était soumis à des informations top-down, pouvant influencer la perception. De façon non-spécifique aux lettres, des études ont montré que nous percevions du mouvement dans des images statiques (Freyd, 1983a; Kourtzi & Kanwisher, 2000 ; Pavan et coll., 2011). Percevons-nous du mouvement lorsque nous regardons des lettres ? Le sens de production des lettres, internalisé dans leurs patrons moteurs et simultanément vu pendant que les lettres se forment, peut-il entraîner une illusion de mouvements de lettres statiques ? En effet, la trace de l'écriture manuscrite (ou certaines polices d'écriture contenant des pleins et des déliés) contient des informations sur la direction de l'écriture : par exemple le point de départ est souvent plus épais que le point final, ce qui favorise la perception de mouvements (Li & Yeh, 2003). Tse et Cavanagh (2000) ont montré qu'un trait constitutif d'un caractère chinois, bien qu'il soit affiché instantanément dans son intégralité sur un écran, semble apparaître avec un certain mouvement, comme s'il était tracé à la main. En outre, les participants chinois, qui savaient écrire ces caractères, voyaient apparaître le trait dans le sens conventionnel d'écriture du chinois, alors qu'un groupe contrôle, constitué de participants américains ne connaissant pas le chinois, le voyait apparaître dans la direction opposée. La pratique de l'écriture d'un système graphique ferait donc évoluer la perception des caractères de ce système d'une perception statique vers une perception dynamique (Tse & Cavanagh, 2000 ; Li & Yeh, 2003), comme l'avait proposé Freyd (1987) pour qui la présentation de caractères manuscrits pourrait activer une représentation mentale dynamique.

Freyd (1983b) avait fait apprendre à des adultes une série de 9 pseudo-lettres présentées dynamiquement sur un écran, mais avec deux ordres d'apparition des traits différents. Chaque participant était entraîné en voyant un ordre puis effectuaient une tâche de reconnaissance visuelle dans laquelle les pseudo-lettres apprises étaient présentées avec une distorsion visuelle qui consistait à représenter par un trait plus fin le déplacement entre deux traits successifs (voir figure 14). Ce déplacement pouvait être en accord avec l'ordre de tracé appris ou en désaccord avec cet ordre. Les résultats ont révélé que les participants acceptaient les pseudo-lettres comme correctes si la distorsion visuelle allait dans le sens de la présentation dynamique apprise. Même si les participants n'ont jamais écrit les lettres pendant l'apprentissage, ils infèrent des propriétés graphomotrices aux pseudo-lettres présentées visuellement. Dans le contexte de l'analyse des composantes visuelles, cela peut laisser penser que certaines composantes/primitives sont dépendantes de la production. Les lettres sont donc fortement associées à leur composante motrice, au point que des propriétés visuomotrices peuvent être transférées à des pseudo-lettres apprises visuellement mais jamais écrites.

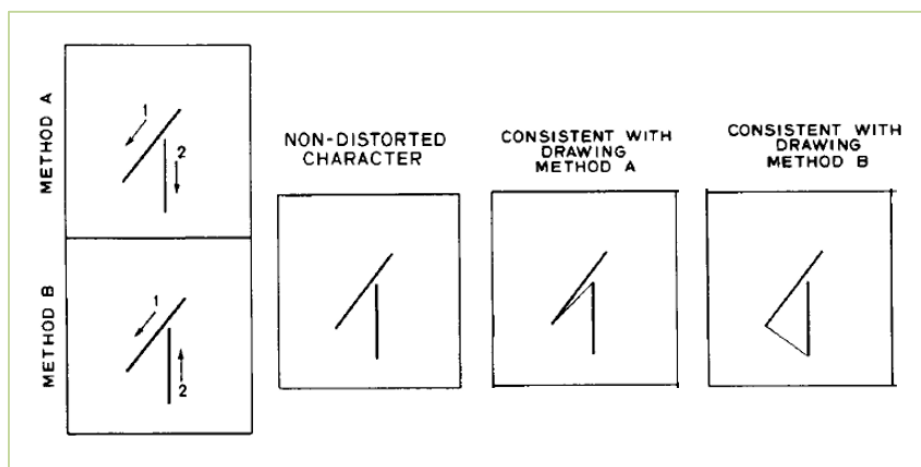


Figure 14 : Exemple de stimuli utilisés dans l'expérience de Freyd, 1983.

Dans une seconde étude, Babcock et Freyd (1988) ont fait apprendre, à des participants, 9 pseudo-lettres présentant des distorsions visuelles. L'étude portait sur le dernier trait des pseudo-lettres. La moitié des participants voyaient des stimuli dont le dernier trait avait été tracé de bas en haut, l'autre moitié des stimuli dont le dernier trait avait été tracé de haut en bas (voir figure 15). Il est important de noter que les lettres

étaient présentées statiquement. Cependant, après l'apprentissage, les participants avaient tendance à tracer le dernier trait dans le sens de la distorsion qu'ils avaient vue. Cela indique qu'une information motrice (le sens de production du dernier trait) est inférée à partir d'une trace statique (la déformation visuelle ; Babcock et Freyd, 1988).

		Instructions			Handwritten Samples
Drawing Method	Up				
	Down				

Figure 15 : Exemple de stimuli utilisés dans l'expérience de Babcock & Freyd, 1988.

Un argument en faveur de l'implication d'information motrice pendant l'observation de lettres statiques a été rapporté par Wiley et coll., (2016). Il s'agit de l'une des rares études consacrées à la perception des lettres de l'alphabet arabe. Pour voir comment la perception des lettres pouvait être modifiée par différentes informations, ils ont réalisé une expérience dans laquelle deux lettres étaient présentées simultanément. Les participants devaient décider le plus rapidement possible si elles étaient visuellement identiques ou non. Le postulat de cette étude était le suivant : plus les deux lettres sont perçues comme semblables, plus les sujets auront tendance à répondre que ce sont les mêmes et/ou plus le temps nécessaire pour répondre qu'elles sont différentes sera long. Les auteurs ont regardé l'effet de différents prédicteurs sur le temps de réponse et son exactitude, parmi lesquels deux se sont avérés prédictifs du jugement de similarité : 1- le fait que les deux stimuli soient des allographes d'une même lettre et 2- la similarité motrice (la proportion de paires de '*strokes*' consécutifs communs entre les deux lettres). Wiley et coll. (2016) confirment donc que des informations motrices vont affecter la reconnaissance des lettres statiques.

Schubert et coll., (2018) rapportent le cas d'une patiente qui présentait une difficulté dans l'identification des lettres depuis leur forme visuelle (elle différenciait les lettres des pseudo-lettres, mais ne différenciait pas les lettres entre-elles). Lorsque les auteurs lui présentaient des lettres de façon dynamique dans le sens de l'écriture, la patiente améliorait le pourcentage de lettres identifiées par rapport à la condition statique. En revanche, les présentations dynamiques inversée au sens d'écriture ou aléatoire n'amélioraient pas l'identification. Selon les auteurs, chez la patiente, l'identification de la lettre à partir de sa représentation visuelle allographique est défaillante mais la présentation visuelle dynamique, indiquant la dynamique dans laquelle la lettre est formée, permet d'activer le patron moteur qui lui-même permet de retrouver l'identité de la lettre (ALI, cf figure 16). Ils proposent une nouvelle version de leur modèle de 2013 (Schubert & McCloskey, 2013) de la reconnaissance des caractères, incluant un rôle de la motricité, de par la séquence motrice contenue dans le programme moteur, dans l'identification des lettres. En résumé, Schubert et coll. (2018) proposent que regarder une lettre se former avec la dynamique correcte active automatiquement le patron moteur correspondant et participe à la reconnaissance des lettres.

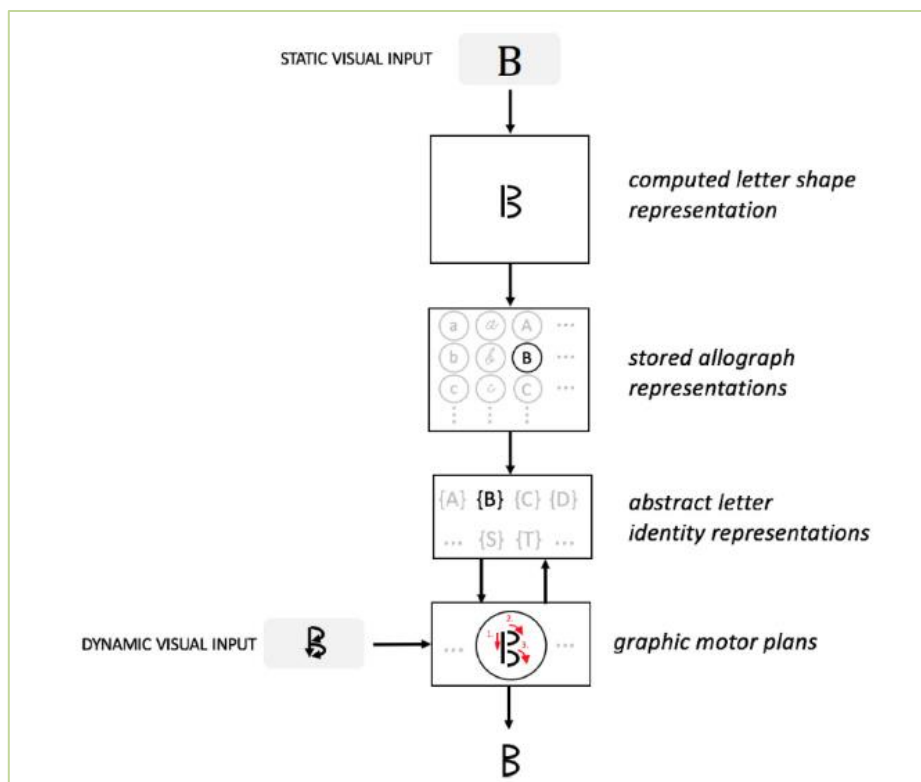


Figure 16 : Modèle de Schubert et coll. 2018 : implication des connaissances motrices dans la reconnaissance des lettres.

Des études chez le sujet sain ont également montré que la vision dynamique de lettres accélérât leur reconnaissance, lorsque la présentation visuelle respectait l'ordre de production des traits en écriture (Parkinson & Khurana, 2007 ; Flores d'Arcais, 1994).

Enfin, l'étude de Wong et coll. (2018) s'est intéressée au cas particulier de l'allographe script de la lettre 'g' (dont la queue forme une boucle) qui est différente de la forme cursive 'g' (queue ouverte ; les anglo-saxons n'utilisent pas la forme cursive 'g'). Tout d'abord, lorsque les auteurs demandent à des participants d'écrire tous les allographes de la lettre g qu'ils connaissent, seul 16% rappelait cet allographe, aucun ne l'avait produit correctement. Lorsqu'il était demandé explicitement aux participants d'écrire cet allographe de mémoire, la quasi-totalité des participants le produisaient de façon erronée. De plus, moins d'un tiers des participants sélectionnait la forme correcte de l'allographe 'g' dans une tâche de choix forcé parmi 3 distracteurs (figure 17).

Les auteurs ont montré que, malgré sa fréquence élevée et sa reconnaissance aisée dans les textes lus, la forme visuelle de cet allographe est inconnue. La particularité de cet allographe est qu'il n'avait jamais été écrit par les participants, il n'était donc pas associé à un patron moteur. Selon les auteurs, la production de mémoire sans patron moteur est possible à partir de sa représentation visuelle, à condition que cette représentation soit assez complète. La difficulté à écrire correctement l'allographe 'g' et à le reconnaître parmi les distracteurs suggère que les composantes visuelles connues de cet allographe ne sont pas précises. Il est donc possible que sans représentation motrice, la forme visuo-spatiale des allographes soit moins détaillée et moins accessible.

1. Correct		28%
2. Tail Reversed		56%
3. Ear Reversed		4%
4. Entire Letter Reversed		12%

Figure 17 : Stimuli utilisés dans l'étude de Wong et coll. (2018) et pourcentage des participants ayant choisi chacune des réponses. Extrait de Wong et coll. (2018)

Les études rapportées ont montré que la perception des lettres serait influencée par des aspects moteur, mais aussi que leur reconnaissance serait aidée par des connaissances motrices, et que la connaissance de la forme visuelle pourrait être dépendante de son écriture manuscrite.

2.2. Apport de la neuroimagerie

Selon les conceptions computo-symboliques, les connaissances seraient représentées de façon amodale, c'est à dire indépendamment des modalités sensorielles. Dans cette conception, les informations sensorielles rattachées aux connaissances seraient donc en quelque sorte perdues. Or, apprendre des connaissances se fait en interaction avec l'environnement par le biais des différents sens (vision, audition, toucher...). La cognition incarnée s'oppose à l'approche computo-symbolique et propose que, pendant l'apprentissage d'une connaissance, toutes les entrées sensorielles impliquées (ainsi que l'état émotionnel ou l'état interne du corps) vont créer en mémoire une représentation (Barsalou, 2008 ; Versace et coll., 2014). Quand une connaissance devra être rappelée, l'ensemble des représentations multimodales associées à cette connaissance seront réactivées (Barsalou et coll., 2003 ; Barsalou, 2008). Barsalou (2008) parle d'un phénomène de simulation mentale.

En ce qui concerne l'écriture manuscrite, les retours sensoriels impliqués créeraient donc au fur et à mesure de l'apprentissage, une représentation multimodale de la lettre. Par la suite, la perception visuelle de la lettre induirait une simulation interne de l'expérience d'écriture qui lui est associée en réactivant les modalités impliquées, dont la sensori-motricité (Barsalou et coll., 2003 ; Longcamp et coll., 2003, 2010 ; Kiefer & Trumpp, 2012). La réalisation d'une simulation motrice mentale pendant la perception de lettres a été appuyée par des études en imagerie montrant que des régions cérébrales motrices étaient activées pendant la perception de lettres, alors qu'aucun mouvement n'était réalisé (Longcamp et coll., 2003, 2005 ; James & Atwood, 2009). L'observation de lettres active automatiquement une partie du cortex prémoteur dorsal, dont nous avons discuté le rôle dans la première partie (Longcamp et coll., 2003, 2008). Cette région motrice était moins activée lorsque les participants regardaient passivement des pseudo-lettres (figure 18), en revanche elle était fortement activée pendant l'écriture des pseudo-lettres, les sujets se trouvant alors en quelque sorte dans une situation d'apprentissage moteur (Longcamp et coll., 2003).

Lorsque les lettres avaient été apprises, mais que l'entraînement ne comprenait pas de tâche motrice, en vision passive, ou en vision passive du mouvement (Kersey & James,

2013), aucune région sensori-motrice n'était activée lorsque les participants observaient les lettres, suggérant que l'implication des régions motrices pendant la perception n'est effective que lorsque des mouvements ont été réalisés pendant l'apprentissage. La reconnaissance des lettres entraînerait donc une activation dans des régions motrices, ce qui plaide en faveur de l'activation d'un réseau multimodalitaire de la lettre. Comme nous le verrons par la suite, un réseau différent est sollicité pendant la perception visuelle des caractères appris au clavier.

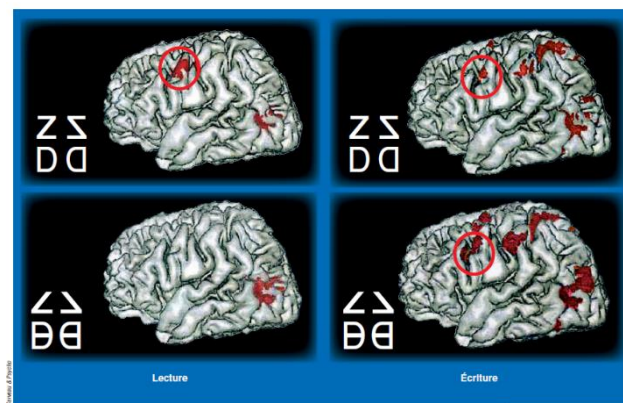


Figure 18 : régions activées pendant la perception (gauche) et production écrite (droite), pour des lettres (haut) et des pseudo-lettres (bas), extrait de Velay et Longcamp (2005).

Ces résultats de neuroimagerie corroborent les résultats comportementaux qui montraient une implication de la motricité pendant la perception des lettres statiques. Si la motricité joue sur la perception visuelle, il serait alors possible que copier des lettres à la main et au clavier ait une influence sur leur reconnaissance visuelle ultérieure. Ce sont ces résultats dont nous allons faire état dans ce qui suit.

2.3. Apprendre à écrire les lettres à la main ou au clavier

Comme nous l'avons souligné dans l'introduction générale, le maintien de l'apprentissage de l'écriture manuscrite fait débat depuis quelques décennies dans les sociétés occidentales car il semble qu'elle soit de moins en moins utilisée, dans la vie professionnelle comme dans la vie personnelle. Certains n'hésitent pas à proposer le remplacement de cette écriture, désuète à leurs yeux, par l'écriture qui serait majoritairement utilisée : l'écriture digitale, donc pratiquée avec un clavier.

Au regard de ce que nous avons évoqué précédemment, remplacer une pratique sensori-motrice par une autre très différente, chez des enfants au moment de l'entrée dans l'écrit, quand les représentations cognitives et cérébrales des caractères, puis des mots et plus largement du langage écrit se construisent, pourrait entraîner des conséquences sur le rapport que ces enfants entretiendraient ensuite avec l'écrit, non seulement en production (écriture), mais également en perception (lecture). Depuis une vingtaine d'années, un certain nombre d'études expérimentales ont été consacrées à cette question : notre façon de lire est-elle influencée par notre façon d'écrire ?

En 2005, Longcamp et coll. se sont précisément posés cette question à propos de la connaissance des caractères alphabétiques. Pour cela, les auteurs ont réalisé une étude chez des enfants pré-lecteurs (de petite, moyenne et grande section de maternelle), en comparant un groupe apprenant les lettres en les copiant à la main et un autre les apprenant en les tapant sur un clavier. Pendant les séances d'entraînement, ils ont fait apprendre 4 mots constitués à partir de 15 lettres majuscules. Les mots étaient présentés visuellement sur un écran d'ordinateur et l'élève devait les recopier. Il y avait un entraînement par semaine, pendant 3 semaines. Ensuite, les auteurs ont fait faire une tâche de reconnaissance visuelle des lettres, pendant laquelle les élèves devaient désigner parmi quatre lettres/pseudo-lettres laquelle avait été apprise. Ce test était réalisé avant de commencer les séances d'entraînement (pré-test), à la fin des 3 semaines d'entraînement (post-test1) et encore une semaine plus tard (post-test2). Chez les élèves les plus âgés, ceux ayant appris en recopiant les lettres à la main ont obtenu un meilleur

taux de reconnaissance par rapport à ceux ayant appris au clavier. Cet avantage était présent immédiatement après la dernière session d'entraînement et également une semaine plus tard. Ce résultat suggère que l'activité motrice produite pendant l'écriture manuscrite favoriserait la mémorisation de la forme visuelle des lettres.

Un avantage de l'écriture manuscrite par rapport à l'écriture au clavier dans la reconnaissance de lettres post-entraînement a été retrouvé par la suite dans plusieurs études, chez l'adulte apprenant un nouveau jeu de caractères (Longcamp et coll., 2006 ; Guan et coll., 2011 ; Cao et coll., 2013 ; Seyll et coll., 2020 ; Wiley & Rapp, 2021) et chez l'enfant (Mayer et coll., 2020). Il est important de noter que ces études varient en ce qui concerne 1. la durée de l'apprentissage (d'une séance unique à 7 semaines d'entraînement), 2. les items appris (pseudo-lettre, lettres étrangères plus ou moins complexes, caractères chinois...) et 3. les tests réalisés (différents tests de reconnaissance) et leurs moments de passation (post-test immédiat ou jusqu'à 5 semaines après le dernier entraînement). Ces études sont résumées dans le tableau en Annexe 1. Dans l'ensemble, elles suggèrent que la copie manuscrite permettrait une meilleure mémorisation de la forme visuelle des caractères appris que la copie au clavier.

2.3.1. Pourquoi un avantage de l'écriture manuscrite par rapport au clavier ?

Nous avons vu que la principale différence entre les deux modes d'écriture découle de la nature même du geste produit pendant l'apprentissage et donc de la représentation qui se met en place. Plusieurs équipes de recherche ont étudié en IRMf les activations neuronales entraînées par la perception de caractères appris à la main ou au clavier (voir Annexe 1).

James et Atwood (2009) ont effectué une session d'IRM avant et après un apprentissage de pseudo-lettres pendant deux jours, à la main, au clavier ou en vision seulement. Les auteurs ont observé que le gyrus fusiforme postérieur et le cortex dorsal précentral, tous deux dans l'hémisphère gauche, se spécialisaient pour la perception des pseudo-lettres apprises, spécifiquement lorsque les pseudo-lettres avaient été copiées à la main (James & Atwood, 2009 mais voir aussi Longcamp et coll., 2008 et James &

Engelhardt, 2012). Selon les auteurs, le cortex dorsal précentral enverrait des copies des efférences motrices vers les régions de la voie ventrale impliquées dans le traitement visuel et pourraient ainsi faciliter la reconnaissance en complétant les informations visuelles par des informations sensori-motrices (James & Atwood, 2009). Cette hypothèse a été testée chez l'enfant, en mesurant la connectivité fonctionnelle en lien avec les gyrys fusiformes gauche et droit. Vinci-Booher et coll. (2016) ont montré que, pour les lettres apprises à la main, il y avait une augmentation de la connectivité fonctionnelle, entre le gyrus fusiforme gauche et les régions prémotrices gauches, suggérant une communication entre les régions visuelles et sensori-motrices lors de la perception de ces lettres, qui n'existe pas lorsque les lettres ont été apprises au clavier.

Ces deux résultats apportent donc deux éléments : -1 les deux modes d'écriture s'intègrent différemment dans le cerveau et -2 cet effet s'observe aussi pendant la perception visuelle des lettres, sans réaliser d'action. Curieusement, lorsque l'apprentissage des caractères a été fait au clavier, la perception des lettres ne semble pas engendrer d'activité spécifique par rapport aux lettres apprises à la main (Longcamp et coll., 2008 ; James & Atwood, 2009). Seule une étude (Cao et coll., 2013) a rapporté une activation plus forte pour les caractères écrits au clavier, dans le gyrus frontal inférieur gauche. Dans cette étude les participants devaient apprendre des caractères chinois, et l'apprentissage ne portait pas uniquement sur la forme visuelle mais aussi sur la phonologie et la sémantique des caractères. Le clavier utilisé était le clavier pinyin qui consiste à écrire un caractère chinois selon sa phonologie à l'aide de lettres latines.

Cependant, on ne peut pas savoir si c'est spécifiquement l'implication des régions motrices qui permet une meilleure reconnaissance des lettres, ou s'il s'agit simplement d'une co-activation sans rôle fonctionnel (Fernandes & Araújo, 2021). Pour cela, il faut établir un lien entre les données de la neuroimagerie et les données comportementales. C'était le cas dans l'expérience relatée par Longcamp et coll. (2008) où l'augmentation des activations dans les régions sensori-motrices allait de pair avec une meilleure identification des caractères et de leur image en miroir. Toutefois, James et Atwood (2009) ont observé des différences cérébrales malgré des taux de reconnaissance visuelle des pseudo-lettres comparables entre les deux conditions d'écriture.

La seconde question que soulève ces études concerne la temporalité des processus. Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, l'écriture manuscrite va permettre, au fur et à mesure de la répétition des gestes, de créer un patron moteur de chaque allographe. Néanmoins, certaines études de neuroimagerie montrent une implication des régions motrices dans la perception des lettres après une seule séance d'apprentissage (James & Engelhardt, 2012 ; Vinci-Booher et coll., 2016), bien qu'au niveau comportemental aucune étude ne rapporte une amélioration de la reconnaissance des lettres après un apprentissage aussi court. Comment interpréter des activations spécifiques après une période aussi brève ? Ces effets pourraient relever d'un effet d'association à court terme dû à la cooccurrence du geste et de la forme visuelle déjà pendant l'apprentissage. Récemment, Vinci-Booher et coll. (2021) ont comparé la perception de pseudo-lettres apprises à la main, ou en vision passive, pendant un entraînement de 45 minutes par jour pendant quatre jours. Ils ont réalisé une session IRM en pré-test, en post-test immédiat et après une semaine pour étudier les changements immédiats et à plus long terme. Ils ont montré un meilleur taux de reconnaissance en post-test immédiat pour les pseudo-lettres ayant été copiées à la main et une augmentation de la connectivité entre les régions visuelles et motrices. Toutefois, une semaine après, alors que la reconnaissance était toujours meilleure pour les lettres ayant été copiées à la main, la connectivité était revenue au niveau de base observé en pré-test. Cependant une autre étude avec des entraînements répartis sur trois semaines a montré une activation spécifique pour les lettres ayant été écrites à la main, une semaine après la fin des entraînements (Longcamp et coll., 2008). Un entraînement plus long pourrait donc engendrer une consolidation plus forte des liens visuo-moteurs.

Malgré les questions en suspens, ces études montrent que les régions impliquées pendant la perception des lettres nouvellement apprises ne sont pas les mêmes selon le mode d'écriture utilisé pendant l'apprentissage. Peut-il y avoir des conséquences à ne pas connaître le patron moteur spécifiquement associé à chaque lettre ? Comme proposé par Schubert et coll. (2018), la composante motrice des lettres pourrait venir seconder la vision lorsque celle-ci est défectueuse. Chez le sujet sain elle devrait donc faciliter la reconnaissance des lettres en condition difficile, comme discriminer deux lettres

visuellement proches, partageant un grand nombre de composantes, comme les lettres en miroir. Longcamp et coll. (2006 ; 2008) se sont spécifiquement intéressés à cette question de l'orientation des lettres. Dans un test de reconnaissance visuelle de lettres nouvellement apprises, les participants ayant appris les lettres en les copiant à la main faisaient moins de confusion entre l'orientation correcte des lettres et l'orientation en miroir que ceux les ayant apprises en les copiant au clavier. Pendant l'écriture, un programme moteur permettant de tracer les lettres est appris, dont le contenu est encore discuté, mais qui inclurait l'ordre et la direction des traits composant les lettres. Or, si les composantes visuelles présentes dans une lettre et dans son image en miroir sont très similaires, l'ordre et la direction de tracé diffèrent nettement entre les deux. Il est donc possible que la présence d'un patron moteur mémorisé permette de lever l'ambiguïté entre les deux représentations visuelles (Longcamp et coll., 2006 ; Wong et coll., 2018).

Quelle limite à cet avantage ?

Pour que les mouvements produits pendant l'apprentissage des caractères à la main soient informatifs et soutiennent la reconnaissance visuelle par la suite, encore faut-il qu'ils soient exécutés convenablement et qu'ils permettent la création d'une représentation motrice cohérente. Or, les enfants très jeunes rencontrent des difficultés pour contrôler leur motricité fine et pour réaliser l'intégration visuomotrice qui permet d'automatiser le mouvement graphique et de constituer une représentation motrice stable des lettres. C'est probablement pour cela que l'avantage du mouvement graphique pendant l'apprentissage n'est pas toujours retrouvé, notamment chez les très jeunes enfants (Longcamp et coll., 2005).

En outre, à cause des difficultés précédemment mentionnées, pour ces enfants produire le geste d'écriture pourrait entraîner une surcharge cognitive, qui réduirait les capacités cognitives disponibles pour l'apprentissage. En effet, en début d'apprentissage, la production écrite demande un contrôle cognitif important (Zesiger et coll., 2000). Dans une étude récente, Palmis et coll. (2021) ont observé que l'écriture de mots chez des enfants activait des régions préfrontales qui n'étaient pas présentes chez un groupe d'adultes, suggérant l'intervention de processus de contrôle attentionnel chez les enfants. Ce résultat est en accord avec les théories de contrainte capacitaire qui proposent que

chaque élève aurait une quantité de ressource cognitive limitée, qui va être répartie entre les différents processus en cours. Selon ces théories, décharger l'élève de certaines contraintes lui permettrait de pouvoir répartir différemment ces ressources (Miller, 1956 ; Lavie, 1995 ; Olive & Piolat, 2005). Dans la production écrite, chez les enfants plus âgés et *a fortiori* chez les adultes, la contrainte liée au geste d'écriture demande une quantité de ressource faible. Mais, chez les enfants les plus jeunes, on peut supposer que réduire la charge cognitive liée à l'écriture manuscrite des lettres pendant l'apprentissage leur permettrait de focaliser davantage leur attention sur la forme visuelle des lettres.

2.3.2. La part des composantes visuelle et attentionnelle dans l'apprentissage manuscrit

Comme nous l'avons présenté dans les pages qui précèdent, l'apport de l'écriture manuscrite à la connaissance des caractères a été généralement attribué aux mouvements d'écriture et donc à la représentation motrice associée à la représentation visuelle des caractères. Cette conception dite 'cognition incarnée' du rôle de la motricité, qui s'est imposée depuis quelques décennies, a été remise en question récemment par des auteurs qui proposent que le mouvement ne soit pas directement responsable de l'apport observé, mais qu'il ne soit qu'un vecteur indirect favorisant un meilleur traitement des entrées visuelles et/ou une plus grande mise en jeu de l'attention apportée aux informations visuelles. Comme il n'est pas aisé de distinguer ce qui relèverait d'une analyse visuelle pure et ce qui relèverait d'une plus grande attention, nous parlerons d'hypothèse 'visuo-attentionnelle' pour présenter cette interprétation du rôle de l'écriture manuscrite.

Nous avons vu que, durant son apprentissage, l'écriture manuscrite nécessite une prise en compte très importante du feedback visuel, à la fois pour contrôler le mouvement en cours d'exécution mais également pour vérifier *a posteriori* la correspondance entre la trace produite et le modèle à reproduire (Zesiger et coll., 2000). Avant et pendant la copie de nouveaux caractères, les scripteurs débutants doivent analyser finement leur forme pour pouvoir la reproduire (Ellis, 1982 ; Zesiger et coll., 2000 ; Zemlock et coll., 2018 ; Seyll et coll., 2020). Ecrire à la main est une façon naturelle de favoriser une analyse visuelle plus détaillée que celle qui est nécessaire dans une situation de simple

observation car elle impose une décomposition de la lettre en chacun de ses traits constitutifs (Seyll et coll., 2020). Comme suggéré par Wong et coll. (2018), la simple observation visuelle ne permet pas de créer une forme visuelle des lettres aussi complète que lorsque la lettre a été écrite (Wong et coll., 2018).

Selon certains auteurs, l'avantage observé de l'écriture manuscrite par rapport au clavier serait la conséquence de cette différence visuo-attentionnelle au moment de l'analyse visuelle des lettres à apprendre. En effet, l'écriture au clavier n'impose probablement pas une analyse visuelle aussi fine que l'écriture manuscrite : elle pourrait être réalisée à partir d'une analyse plus globale de la forme de la lettre, sans passer par une décomposition trait par trait des caractères. Pour tester cette hypothèse, Seyll et coll. (2020) ont comparé chez des adultes l'apprentissage de pseudo-lettres selon trois modalités : un groupe les copiait à la main, un groupe les copiait au clavier et un groupe les apprenait en faisant une 'composition' des pseudo-lettres. Les participants de ce groupe 'composition' devaient reconstituer la lettre en déplaçant les différents traits la composant. Après l'apprentissage, les auteurs ont observé de meilleurs scores de reconnaissance par rapport au clavier pour le groupe manuscrit mais aussi pour le groupe 'composition'. Les deux modes d'apprentissage ne se différiaient pas (Seyll et coll., 2020). Les auteurs ont donc conclu que l'implication motrice dans l'écriture manuscrite ne favorisait pas plus l'apprentissage des lettres qu'une tâche n'impliquant pas de mouvement en lien avec la lettre, mais qui oblige à fixer son attention sur les traits composant les lettres.

Dans une revue très récente, Fernandes & Araújo, (2021), proposent que l'hypothèse de l'analyse visuo-attentionnelle et celle de la composante motrice ne sont peut-être pas à opposer, mais qu'elles peuvent être complémentaires. Cependant, ces deux mécanismes devraient avoir une temporalité différente. L'apport de la représentation motrice de la lettre ne peut être présent que lorsque l'apprentissage est assez long et qu'une représentation sensori-motrice a pu se former. L'analyse visuelle plus profonde pendant l'écriture manuscrite que pendant l'écriture au clavier devrait quant à elle apparaître immédiatement après l'apprentissage.

Enfin, une dernière hypothèse a été avancée pour expliquer l'avantage de la pratique de l'écriture manuscrite par rapport à l'écriture au clavier dans l'apprentissage des lettres : on pourrait la qualifier d'hypothèse de la 'variabilité des formes visuelles' (Li & James, 2016). Comme le contrôle moteur n'est pas toujours efficient au moment où l'enfant apprend à écrire à la main, il s'écoule toute une période pendant laquelle les formes de lettres produites sont plus ou moins variables et l'enfant doit apprendre à regrouper (ou catégoriser) toutes ces formes sous la même identité abstraite. Si on ajoute à cette variabilité intra-individuelle, celle des lettres écrites par les autres enfants ou adultes qui l'entourent (variabilité inter-individuelle), le nombre de formes visuelles vues pour une lettre donnée doit être assez important. Selon cette théorie, ce processus actif de catégorisation malgré la variabilité des lettres vues permettrait d'apprendre les caractéristiques informatives des lettres. L'enfant extrairait plus facilement les composantes visuelles pertinentes que lorsque les lettres sont présentées en un seul exemplaire comme c'est le cas dans l'écriture au clavier (Li & James, 2016 ; Vinci-Booher et coll., 2021). En faveur de cette hypothèse, Bara et coll. (2016) ont montré que des élèves québécois de grade 1 (6 ans) apprenant à écrire en cursive et script lisaient davantage de mots que des élèves apprenant l'écriture script uniquement. Selon les auteurs apprendre différents allographes pourrait favoriser l'apprentissage d'une représentation abstraite des lettres, utilisée dans la lecture de mot (Bara et coll., 2016).

2.3.3. L'écriture manuscrite permet-elle un meilleur apprentissage de la phonologie et de la lecture ?

La particularité sensori-motrice de l'écriture manuscrite semble donc jouer un rôle lors de l'apprentissage des lettres, notamment sur leur reconnaissance visuelle. Cependant, en condition écologique, l'apprentissage des lettres se fait conjointement à l'apprentissage de leur phonologie et de leur lecture dans des contextes sémantiques. On peut donc se demander jusqu'à quel point l'écriture manuscrite ne pourrait pas aussi favoriser l'apprentissage de ces aspects phonologiques, voire lexicaux ou sémantiques. Dans ce travail de thèse, nous nous intéressons aux prémices de l'apprentissage, soit la connaissance des lettres et du décodage, la première étape de la lecture.

Kiefer et coll. (2015) et Mayer et coll. (2020) ont réalisé des études similaires à celle de Longcamp et coll. (2005) avec des élèves de maternelle, mais comprenant des séances d'apprentissage plus complètes. Pendant ces séances, différentes activités étaient réalisées faisant travailler les lettres, la lecture et l'écriture. Cet entraînement est donc plus proche des situations de classe, bien qu'ils aient été réalisés individuellement. Dans l'étude de Kiefer et coll. (2015), pendant l'apprentissage 12 élèves écrivaient les réponses à la main et 11 au clavier. Il y avait quatre entraînements par semaine pendant quatre semaines. Avant de commencer la phase d'apprentissage, les élèves réalisaient trois tâches pour mesurer leurs connaissances initiales : une tâche de rappel libre des lettres, de reconnaissance des lettres et de dénomination des lettres. A la fin des 4 semaines, les enfants étaient soumis à des post-tests, ceux déjà présents en pré-test, et des tests plus complexes : la lecture de trois mots, une dictée des lettres et une dictée de quatre mots. Les tests identiques au pré-test étaient réalisés à la main, les autres étaient réalisés selon la modalité d'apprentissage. Les auteurs n'ont pas observé de différence sur la reconnaissance et la dénomination, ni sur la lecture de mots (celle-ci était meilleure pour le groupe manuscrit mais cette différence n'était pas significative). Ils observaient un avantage du groupe manuscrit dans le rappel libre de lettres (mais qui peut être expliqué par la différence entre la modalité d'écriture entraînée et celle du test, qui était passé à l'écriture manuscrite par tous les élèves) et dans la dictée de mot (faite dans la modalité entraînée). La différence sur la tâche de reconnaissance entre leurs résultats négatifs et ceux de Longcamp et coll. (2005), peut être expliquée par un effet plafond : dans l'étude de Kiefer et coll. (2015), les lettres étaient en effet reconnues dans les deux groupes à plus de 95% en post-test. Une tâche plus complexe, comme la dictée de mots montre, elle, un avantage du manuscrit. Selon les auteurs la représentation sensori-motrice des caractères créée pendant l'écriture manuscrite explique les meilleures performances et montre donc un effet du mode d'apprentissage dans l'écriture sous dictée, soit dans l'association phono-graphémique.

Dans un protocole similaire chez des enfants de 5ans, Mayer et coll. (2020) ont ajouté au groupe manuscrit et clavier, un troisième groupe écrivant de façon manuscrite mais sur tablette numérique. Pendant 7 semaines, à raison de 4 séances par semaine, les enfants ont travaillé 16 lettres (et 12 mots composés à partir de ces lettres) dans les mêmes activités que celles réalisées par Kieffer et coll. (2015). Les mêmes tests ont été

réalisés avant et après l'entraînement ainsi que 4 semaines plus tard. Les auteurs ont observé de meilleurs résultats pour le groupe ayant écrit sur papier dans une tâche de reconnaissance des lettres par rapport au groupe ayant écrit au clavier. Mayer et coll. (2020) reproduisent donc les résultats de Longcamp et coll. (2005) : un entraînement en copiant de façon manuscrite permet une meilleure reconnaissance des caractères chez les enfants de grande section de maternelle, par rapport à un entraînement au clavier. Ce résultat est à nuancer car l'écriture manuscrite au stylet sur tablette n'a pas permis de bénéficier d'un avantage moteur, peut-être à cause des différences de retours sensoriels entre l'écriture sur papier et sur la surface de la tablette. De façon intéressante, les élèves ayant bénéficié du clavier lisaient et écrivaient mieux les mots que ceux du groupe ayant appris sur tablette. Selon les auteurs, l'avantage du clavier étant seulement observé par rapport au groupe qui écrivait sur tablette, ça ne serait pas la simplicité des programmes moteurs du clavier qui permettrait une meilleure mémorisation de la composante phonologique. Il s'agirait plutôt de l'écriture au stylet qui serait trop coûteuse et pénaliserait les élèves. Néanmoins, ce résultat relativise l'avantage du manuscrit en indiquant que dans des conditions d'écriture « complexe » le clavier permet tout de même d'obtenir de meilleures performances dans l'association phonologique. Globalement, cette étude ne met donc pas en évidence un avantage de l'écriture manuscrite dans l'association grapho-phonologique.

Récemment, Wiley et Rapp (2021) ont fait apprendre des lettres présentées visuellement sur un ordinateur et le participant entendait le nom de la lettre. Pendant l'apprentissage, un tiers des participants recopiait les lettres à la main, un tiers les tapait sur un clavier adapté et un tiers les regardait sans réaliser d'action. Même s'ils ne prononçaient pas le nom des lettres, après 6 séances d'entraînement les participants des trois groupes augmentaient le nombre de lettres correctement dénommées. Toutefois, le groupe ayant copié les lettres de façon manuscrite augmentait davantage ses performances que les deux autres. Contrairement au précédent, ce résultat indique donc que l'écriture manuscrite favoriserait l'apprentissage de l'association grapho-phonologique.

Ces trois études comparant l'écriture manuscrite à l'écriture au clavier ne permettent pas vraiment de conclure sur le rôle de la composante motrice dans l'apprentissage de

l'association grapho-phonologique. Cependant, plusieurs études ont montré un avantage de la motricité dans l'apprentissage de la relation phonologique par rapport à une tâche visuelle (Gentaz et coll., 2003 ; Bara et coll., 2004, 2007). Bara et coll. (2007) ont comparé des élèves de 5 ans suivant un apprentissage purement visuel des lettres latines à un groupe apprenant visuellement, mais aussi par une exploration haptique. L'exploration haptique consistait à toucher une lettre en relief et à la parcourir avec l'index dans le sens d'écriture. Ces auteurs ont montré que l'implication de la motricité pendant l'apprentissage favorisait l'association entre une lettre et son nom, ainsi que la lecture de pseudo-mots. Cela montre l'avantage d'un apprentissage multisensoriel, impliquant la motricité pour favoriser l'association entre une forme visuelle et le son qui lui correspond. Un résultat comparable a été observé par Labat et coll. (2020), chez des élèves de 5 ans. Les auteurs ont observé une augmentation de la correspondance grapho-phonémique et une meilleure lecture des pseudo-mots lorsque les enfants traçaient avec le doigt la lettre sur l'écran par rapport aux élèves qui la regardaient uniquement.

Enfin, chez des enfants chinois (7 à 9 ans) apprenant de nouveaux caractères, Xu et coll. (2020) ont montré un avantage de l'écriture manuscrite par rapport à la vision simple sur la lecture de ces caractères. De façon intéressante, dans cette étude un groupe d'élève apprenait la lettre en la traçant en l'air avec l'index, et ce groupe avait des résultats comparables à celui écrivant sur une feuille avec un stylo. Ce résultat suggère que les composantes sensorielles liées à l'utilisation du stylo n'amélioreraient pas cet apprentissage, tant qu'une forme de production motrice est réalisée.

Si la motricité favorise l'association entre la forme visuelle d'une lettre et le phonème par rapport à la vision seule, les résultats moins clairs concernant la comparaison manuscrit et clavier pourraient-ils être dus à un apport sensori-moteur possible du clavier ?

Cette hypothèse peut être soutenue par l'étude de Guan et coll. (2011) qui ont entraîné des participants non-chinois à apprendre des caractères chinois, à la main ou au clavier. Le clavier utilisait le système '*pinyin*', qui consiste à transcrire les phonèmes du chinois en

lettres latines. Les auteurs ont observé un avantage du clavier dans l'association grapho-phonologique, mais également phono-sémantique. Cependant, ce résultat n'a pas été retrouvé par Cao et coll. (2013). Des différences méthodologiques peuvent expliquer ces résultats contradictoires. Dans l'étude de Guan et coll. (2011) les participants devaient traduire le mot qui était présenté en mandarin en pinyin, alors qu'il était présenté directement en pinyin et copié dans l'étude de Cao et coll. (2013).

Synthèse intermédiaire

Cette première partie théorique avait pour but de montrer que les deux façons d'écrire, l'écriture manuscrite et l'écriture au clavier, ne mobilisent pas les mêmes processus sensoriels, moteurs et cognitifs, chez l'adulte expert et, *a fortiori*, chez l'enfant débutant. Nous avons présenté des arguments théoriques, fondés sur des modèles basés sur différentes approches (computo-symboliques, psychologie cognitive...) qui peuvent expliquer pourquoi écrire à la main pourrait influencer les représentations cognitives et cérébrales sous-jacentes à la connaissance des caractères alphabétiques. Changer de mode d'écriture au moment de l'apprentissage, en optant pour un apprentissage direct de la dactylographie, pourrait donc entraîner des conséquences plus générales sur les représentations cognitives de l'écrit, et peut-être sur la lecture.

Dans l'ensemble, les résultats des expérimentations dans lesquelles ont été comparées les deux pratiques de l'écriture suggèrent que l'écriture manuscrite est plus favorable à l'apprentissage des caractères alphabétiques que l'écriture au clavier. Toutefois, ces résultats ne permettent pas de conclure de façon définitive à un avantage de l'écriture manuscrite, au détriment de l'écriture dactylographique, et cela pour plusieurs raisons.

La première est la durée trop courte des expérimentations, en général quelques semaines, pendant lesquelles seules quelques séances d'entraînement ont été réalisées. Ces durées ne sont pas compatibles avec les durées d'apprentissages scolaires qui sont beaucoup plus longues. C'est particulièrement le cas de l'apprentissage de l'écriture manuscrite qui peut s'étaler sur plusieurs années. Par conséquent, la 'profondeur cognitive' de ce qui est appris en si peu de temps n'est jamais très grande. Il serait pertinent d'effectuer une comparaison plus longue entre les deux apprentissages de l'écriture, de plusieurs mois voire de plusieurs années. Bien sûr, cela est difficile à réaliser à cause de l'interférence qu'une expérimentation aussi longue générerait avec les programmes imposés pour les apprentissages scolaires.

Pour éviter les interférences avec la scolarité, un certain nombre d'études ont été réalisées avec des apprenants adultes à qui on a fait apprendre de nouveaux caractères

alphabétiques. Mais là aussi, les limites de ces études sont multiples. D'abord, la durée d'expérimentation n'est pas plus longue, car on ne peut pas mobiliser les participants pendant plusieurs mois, donc les mêmes critiques s'appliquent quant à la profondeur de ce qui est appris. En outre, les adultes savent déjà écrire à la main : ils ne sont donc plus débutants en termes de graphomotricité et rien ne permet d'affirmer que les processus cognitifs impliqués dans l'apprentissage de nouveaux caractères par des adultes experts sont les mêmes que ceux à l'œuvre chez des enfants débutants.

Enfin, le contexte expérimental des études réalisées chez l'adulte, et souvent chez l'enfant, n'a rien à voir avec le contexte scolaire dans lequel les apprentissages devraient se dérouler. Apprendre de nouveaux caractères n'est pas une finalité en soi : cela ne prend tout son sens que lorsque ces caractères alphabétiques appartiennent à un système graphique qui lui-même permet la transcription d'une langue. Les lettres ne sont pas simplement des formes visuelles à mémoriser : elles sont associées à un ou des sons et, enchaînées les unes aux autres, elles permettent d'écrire et de lire des nouveaux mots que les élèves entendent d'abord prononcés par l'enseignant, puis qu'ils répètent et qui prennent leur signification dans un contexte donné. Par conséquent, une expérimentation pertinente sur la meilleure façon d'apprendre à écrire devrait se dérouler dans un contexte le plus écologique possible, c'est-à-dire en immersion scolaire totale, les élèves étant en salle de classe face à un enseignant, pendant une longue période temporelle. Idéalement, puisqu'on s'intéresse à des apprentissages fondamentaux, lire et écrire, cette étude comparative devrait se dérouler au moment où ces fondamentaux langagiers commencent à être enseignés, autrement dit à partir de l'école maternelle ou au tout début de l'école élémentaire.

Il va de soi qu'une expérimentation 'idéale' comme celle-là pose de tels problèmes de mise en œuvre, et s'avère impossible à réaliser pratiquement. Une demande de principe avait été faite (en 2016, par J-L Velay) auprès du Rectorat de l'académie d'Aix-Marseille qui a très vite décliné l'offre, arguant que l'intérêt scientifique et pédagogique indéniable de cette expérimentation de terrain ne justifiait, ni les problèmes d'organisation qu'elle

engendrerait, ni les risques éventuels qu'elle ferait courir aux élèves en perturbant leur apprentissage de l'écriture manuscrite qui est un prérequis pour l'entrée au collège.

Afin de pallier ces problèmes éthiques et de ne pas pénaliser des enfants qui n'apprendraient pas à écrire en français à la main au début de leur scolarité, nous avons décidé de nous intéresser à l'apprentissage d'une langue seconde, pour lequel la liberté pédagogique est plus grande que pour l'apprentissage fondamental du français. Bien entendu, il était indispensable que cette langue soit basée sur un système graphique différent du français, c'est-à-dire différent de l'alphabet latin grâce auquel sont transcrites la majorité des langues occidentales. Un inventaire des langues enseignées dans l'académie a permis de constater que plusieurs langues répondaient à ce critère, parmi lesquelles : l'arabe, l'arménien, l'hébreu, le russe et le chinois. Très rapidement, le choix s'est porté sur la langue arabe qui est enseignée dans un nombre conséquent d'établissements scolaires de l'académie d'Aix-Marseille, donc à un nombre assez important d'élèves (contrairement à l'arménien, au russe ou au chinois...). De plus, l'arabe est basé sur un système alphabétique proche du système latin (contrairement au chinois) mais différent d'un point de vue graphomoteur puisqu'il s'écrit de droite à gauche. C'est une langue aussi enseignée, à titre optionnel, dans certaines écoles élémentaires (publiques et privées) dans le contexte des '*enseignements des langues et cultures d'origine*' (ELCO). Elle est également enseignée, toujours à titre optionnel, dans certains collèges (publics ou privés), par des enseignants relevant de l'éducation nationale. Au moment de leur entrée au collège (6ème), les élèves sont plus âgés (11 ans environ), et ils maîtrisent (théoriquement) la graphomotricité, dont l'apprentissage a eu lieu avant, au moment de l'apprentissage du français, en maternelle puis en primaire.

Lorsqu'elle a été faite à l'académie, cette proposition de recherche consistant à comparer deux méthodes d'enseignement de l'arabe écrit, basées sur l'écriture manuscrite traditionnelle et sur l'écriture dactylographique sur tablette, a été positivement considérée. C'est cette étude sur l'apprentissage de l'arabe, à la main ou au clavier, qui fait l'objet de la première partie expérimentale qui est relatée dans cette thèse.

Mais ce choix, s'il permet de contourner les problèmes éthiques que nous avons évoqués, soulève de nouvelles questions théoriques liées au fait que les élèves

potentiellement impliqués dans le protocole expérimental : 1. Ils ont déjà une pratique de plusieurs années de l'écriture manuscrite du français, 2. Ils apprennent une nouvelle langue et un nouveau système graphique et deviennent de ce fait bilingues et 'bigraphes'.

Les nouvelles questions auxquelles nous avons été conduits à nous intéresser sont donc les suivantes :

- - Tous les systèmes graphiques sont-ils équivalents du point de vue des processus cognitifs et cérébraux impliqués ? Et en particulier en français et en arabe, dont le sens d'écriture est opposé ?
- Que se produit-il au niveau cérébral chez des individus qui maîtrisent ces deux systèmes graphiques ?

C'est à ces questions que nous allons tenter de répondre dans la seconde partie du contexte théorique. Ce sont aussi ces questions qui ont suscité la deuxième partie expérimentale de cette thèse, dans laquelle nous avons étudié les processus cérébraux impliqués dans l'écriture des caractères latins et arabes chez des adultes bigraphes, experts dans les deux langues.

3. Bigraphie et universalité des réseaux cérébraux des langues écrites

3.1. La bigraphie et les différents systèmes graphiques

Aujourd'hui de plus en plus de personnes sont bilingues. Pour la majorité des occidentaux, les langues parlées utilisent le système graphique (SG) basé sur l'alphabet latin, comme c'est le cas pour le français et l'anglais. En plus d'être bilingues, certaines personnes sont bigraphes, c'est-à dire que les deux langues qu'elles parlent s'écrivent dans deux systèmes d'écriture différents (par exemple le français et l'arabe). Dans certains cas, un bigraphe peut également être monolingue, comme c'est le cas dans certains pays où la langue orale peut être écrite avec plusieurs systèmes graphiques. Par exemple, le japonais peut être écrit en kanji ou en kana, tandis que le serbe peut être écrit en caractères latins ou cyrilliques. Généralement, le bigraphisme est donc la capacité de lire et d'écrire avec deux systèmes graphiques différents (Bunčić et coll., 2016 ; Usanova, 2019 ; Younes-Harb et coll., 2016).

Les travaux présentés dans les deux premiers chapitres sont principalement issus d'études effectuées chez le monographe utilisant l'alphabet latin. Relativement, peu d'études se sont intéressées à d'autres langues et encore moins au cas particulier du bigraphisme. Le traitement cognitif des caractères alphabétiques est-il organisé de la même manière dans les autres systèmes graphiques ? Et chez le bigraphe ? Les bigraphes traitent-ils les deux systèmes graphiques qu'ils connaissent par le biais de la même architecture neuronale ? Ou des processus spécifiques sont-ils recrutés en fonction des caractéristiques particulières de chaque système graphique ?

Pour répondre à ces questions, il faut comprendre quelles sont les différences entre les systèmes graphiques étudiés. Habituellement, on distingue trois types de systèmes graphiques en fonction des liens entre les caractères écrits et le langage parlé : les systèmes logographiques, syllabique et alphabétique (Treiman & Kessler, 2014) :

- Les systèmes logographiques sont basés sur les aspects sémantiques du langage. Ces systèmes, comme le système chinois, sont basés sur des morphèmes (plus petite unité ayant du sens). En chinois, plusieurs morphèmes sont associés pour former un mot. Le nombre de caractères est donc très élevé.
- Les systèmes syllabiques, comme le kana en japonais, sont basés sur des caractéristiques phonologiques du langage. Il y a un caractère par syllabe. Les caractères ne sont pas forcément similaires pour deux syllabes dont la phonologie est proche.
- Les systèmes alphabétiques sont également basés sur des caractéristiques phonologiques du langage, et chaque caractère représente la plus petite unité du langage : le phonème. Avec quelques douzaines de caractères, l'ensemble des mots peuvent être écrits. Si les caractères latins ont des formes qui n'ont pas de rapport avec les phonèmes qu'ils représentent, dans certains alphabets comme le hangeul coréen, les lettres ont des caractéristiques visuelles proches en fonction des caractéristiques articulatoires du phonème.

Daniels et Share (2018) ont proposé 10 dimensions qui peuvent affecter l'acquisition de la lecture et qui peuvent être réparties dans 3 classes principales : la structure du langage oral, les caractéristiques des formes visuelles (la complexité, le nombre de caractères/allographes, et l'uniformité des caractères) et les règles d'association entre langage oral et forme visuelle. Outre ces différences, la manière de tracer les caractères peut varier d'un système à l'autre, et cette dimension est actuellement très peu prise en compte.

Dans ce travail de thèse, nous nous intéressons à deux systèmes graphiques alphabétiques basés sur des alphabets différents, l'arabe et le latin. Les lettres de ces deux alphabets sont proches de par leur complexité visuelle, même si les lettres arabes comportent plus de traits discontinus (Chang et coll., 2018). Cependant les deux systèmes graphiques diffèrent par le sens de lecture et d'écriture, de gauche à droite pour le latin et de droite à gauche pour l'arabe. Nous reviendrons dans le dernier chapitre sur ces différences spécifiques entre l'arabe et le latin.

3.2. Le débat de l'universalité

Les mécanismes cognitifs et neuronaux impliqués dans le traitement des caractères écrits sont-ils les mêmes pour tous les systèmes graphiques ? Cette question a suscité des débats dans la littérature.

3.2.1. Universalité des réseaux de la lecture

La question de l'universalité du traitement de l'écrit a été principalement étudiée dans le domaine de la lecture et au niveau du mot. Les processus à l'origine de l'acquisition de la lecture ont été proposés comme étant universels : le principe est d'apprendre à transformer une ou plusieurs formes graphiques en sons et en sens (Ziegler & Goswami, 2005). Cependant, différentes spécificités des langues peuvent affecter l'apprentissage de celles-ci (Daniels & Share, 2018). En conséquence, pour certains auteurs, la lecture repose sur le même réseau, quelle que soit la langue (Liu et coll., 2008; Nakamura et coll., 2012; Dehaene, 2014), tandis que pour d'autres, des modifications de ce réseau vont être possibles en fonction des caractéristiques du système graphique (Perfetti et coll., 2013).

Au plan cérébral, un argument en faveur d'une universalité des traitements du langage écrit est qu'une spécialisation de l'aire visuelle de la forme des mots (VWFA) a été retrouvée dans de nombreux systèmes graphiques : en latin (Cohen & Dehaene, 2004 ; Dehaene et coll., 2010 ; Dehaene-Lambertz et coll., 2018), en hindi (Hervais-Adelman et coll., 2019) ou encore en chinois (Liu et coll., 2008 pour les adultes et Krafnick et coll., 2016 ; Feng et coll., 2020 pour les enfants). Ainsi, l'implication de la VWFA dans la lecture pour différents systèmes graphiques est aujourd'hui admise. Chez les bigraphes, certaines études ont montré une superposition des régions dans le gyrus fusiforme répondant spécifiquement aux deux systèmes graphiques, chez des bigraphes chinois/coréens (Bai et coll., 2011), chinois/anglais (Wong et coll., 2009) ou encore anglais/hébreu (Baker et coll., 2007).

Etudes comparant le chinois et l'alphabet latin

Le débat sur l'universalité des réseaux cérébraux de la lecture a été très actif dans la comparaison entre le chinois (un système quasi logographique) et les systèmes basés sur l'alphabet latin. Ce débat est encore actuel, en particulier en ce qui concerne l'universalité des troubles de la lecture chez les enfants et leurs corrélats cérébraux (Feng et coll., 2020). De nombreuses études ont cherché à définir si le système graphique Chinois était traité par les mêmes réseaux cérébraux que le système latin.

Nakamura et coll. (2012) ont apporté un argument empirique fort à l'hypothèse de processus communs entre le français et le chinois. Dans une tâche de lecture de mots chez un groupe de chinois et un groupe de français, les auteurs ont manipulé deux caractéristiques : la trajectoire de l'apparition dynamique des mots (dans le sens de l'écriture, dans le sens contraire de l'écriture ou statique) et l'espacement entre les lettres ou les traits (normal ou serré ; plus complexe visuellement). Les auteurs ont utilisé le paradigme de '*repetition priming*' dans lequel, lorsque l'amorce et la cible sont les mêmes on observe une réduction de la réponse neuronale dans certaines régions, qui indique que ces régions sont sensibles à la caractéristique partagée entre l'amorce et la cible. Les auteurs ont observé les mêmes effets de '*repetition priming*' en français et en chinois dans deux régions : la VWFA dans le gyrus fusiforme (FuG) et le cortex prémoteur dorsal (PMd). Le FuG montrait un effet de l'amorce maximum quand la cible apparaissait de façon statique non déformée. Le PMd, qui, comme nous l'avons dit, code pour le geste d'écriture, montrait un effet maximal de l'amorce quand la cible était en mouvement dans le sens d'écriture. Ces deux effets se retrouvaient de la même manière dans les deux langues suggérant donc deux sous-systèmes, l'un visuel et l'autre gestuel, impliqués dans la reconnaissance des mots indépendamment du système graphique (voir aussi Liu et coll., 2008 ; Rueckl et coll., 2015)

Au contraire, plusieurs études ont mis en évidence des différences neurofonctionnelles entre le chinois et le latin (figure 19). En plus de l'activation du gyrus fusiforme gauche, les caractères chinois activeraient davantage que les systèmes alphabétiques une région homologue dans l'hémisphère droit (Tan et coll., 2003 ; Liu et coll., 2008 ; Cao et coll., 2010 ; Szwed et coll., 2014 ; Krafnick et coll., 2016 ; Cao & Perfetti, 2016), les lobes pariétaux supérieurs gauche et droit (Tan et coll., 2003 ; Cao & Perfetti, 2016 ; Cao et coll., 2010) et le gyrus frontal moyen dorsal gauche (BA9) (Bolger et coll., 2005 ; Tan et coll., 2005 ;

Perfetti et coll., 2013). A l'inverse, le gyrus frontal inférieur gauche et le gyrus temporal supérieur gauche seraient plus activés pour les langues utilisant des systèmes alphabétiques que pour le chinois (Bolger et coll., 2005 ; Tan et coll., 2005 ; Cao et coll., 2013). De plus, Szwed et coll. (2014) ont montré qu'il existait une spécialisation dans certaines régions du cortex visuel pour les caractères chinois et les lettres latines (Szwed et coll., 2014). Les lettres latines impliqueraient davantage les régions visuelles de bas niveau V1 et V2 gauche alors que les caractères chinois impliqueraient davantage les régions visuelles de plus haut niveau V4/V5.

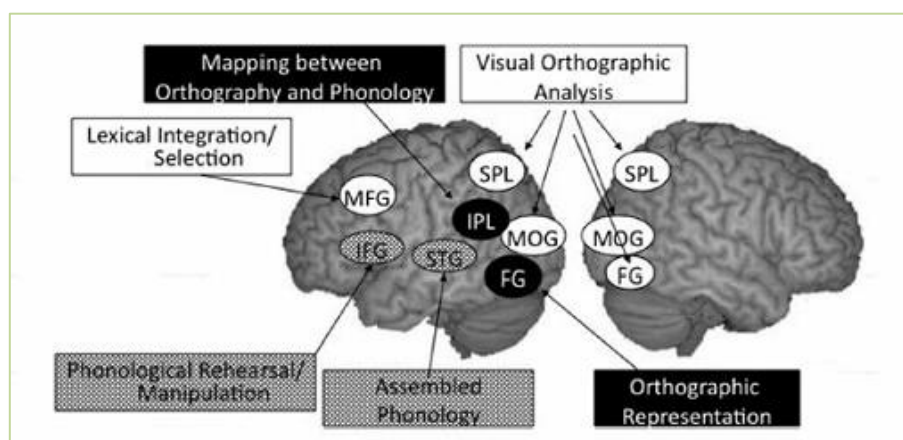


Figure 19 : Régions cérébrales impliquées dans la lecture de l'anglais et du chinois. Blanc : chinois>anglais, Gris : anglais>chinois et Noir : commun aux deux systèmes graphiques. Extrait de Perfetti et coll., 2013.

L'ensemble de ces différences a été discuté dans la littérature avec l'idée que le chinois sollicite davantage certains processus cognitifs que le latin et inversement. Par exemple, la plus forte activation des régions postérieures bilatérales pour le chinois par rapport au système latin a été expliquée principalement par la composante visuelle de la lecture. En effet, le chinois a une structure visuo-spatiale complexe, qui nécessite une analyse visuelle plus holistique qu'une langue alphabétique (Perfetti et coll., 2013). Cependant, le chinois et les langues basées sur l'alphabet latin diffèrent massivement sur d'autres aspects comme la mise en correspondance de l'orthographe et de la phonologie au niveau des caractères entiers (Tan et coll., 2005), mais aussi du nombre de caractères existants.

Cependant, si l'organisation du système cérébral pendant la lecture peut différer selon la langue lue, on peut se demander si le même phénomène s'observe à l'écrit au regard d'une spécificité motrice. Est-ce que le système moteur pourrait s'organiser différemment pour écrire des systèmes graphiques qui demandent des gestes très différents ?

3.2.2. Universalité des réseaux de l'écriture

Ecriture dans d'autres systèmes que le système alphabétique latin :

Très peu d'études se sont intéressées à l'universalité des réseaux de l'écriture, mais le même débat s'observe. La majorité des études consacrées à l'écriture en imagerie fonctionnelle ont été faites sur des langues utilisant le système latin. Certaines études sur l'écriture ont été réalisées dans d'autres systèmes graphiques, et montrent des activations similaires à celles trouvées pour le système latin, notamment en chinois, (par exemple (Sugihara et al., 2006; Lin et al., 2007)). Cependant, une étude récente sur les corrélats cérébraux de l'écriture du chinois (Yang et al., 2019) a comparé une tâche d'écriture de caractères chinois sous dictée par rapport au tracé de cercles chez 33 adultes chinois. Les auteurs ont retrouvé les régions clés du réseau de l'écriture : le cortex prémoteur dorsal, le lobe pariétal supérieur gauche, le gyrus fusiforme gauche et le cervelet, mais également des régions situées dans l'hémisphère droit : le gyrus fusiforme, les régions motrices frontales et le gyrus moyen occipital droit. L'activation de ces régions supplémentaires a été interprétée, comme pour la lecture, par des mécanismes impliqués dans le traitement visuo-spatial spécifique au Chinois (voir aussi Cao & Perfetti, 2016).

Corrélats cérébraux du bigraphisme :

Il y a très peu d'études portant sur les corrélats cérébraux de l'écriture chez des bigraphes (mais voir Nakamura et coll., 2002 ; Lin et coll., 2007) . Cependant il existe quelques descriptions de cas cliniques montrant des atteintes spécifiques de l'écriture dans l'un des deux systèmes graphiques pratiqués, suggérant que des régions cérébrales distinctes interviennent dans l'écriture des deux systèmes. La plupart des cas rapportés

étaient des patients japonais (Kawamura et coll., 1987 ; Yokota et coll., 1990 ; Sakurai et coll., 1994 ; Maeda & Ogawa, 2011 ; Ogura et coll., 2013). Les tests effectués étaient en général des tâches d'écriture de mots, en copie ou dictée ou en transcription d'un système graphique (SG) à l'autre.

En effet, en Japonais les mots peuvent s'écrire avec deux SG : le kanji et le kana. Le kana est un système syllabique alors que le kanji, emprunté au système chinois, est logographique. Par ailleurs, le 'romanji' est une façon récente d'écrire le japonais, en transcrivant phonologiquement le langage oral japonais en utilisant l'alphabet latin.

Dans la littérature sur la dysgraphie acquise, plusieurs études ont décrit des dissociations entre écriture du kanji, du kana et du romanji. Le plus souvent, le kanji est plus affecté à la suite de lésions situées dans le lobe temporal gauche (Kawamura et coll., 1987; Yokota et coll., 1990; Sakurai et coll., 1994, 2010; Maeda & Ogawa, 2011). D'autres études de cas ont rapporté une agraphie sélective du kana préservant le kanji, après une lésion dans la partie moyenne gauche du gyrus précentral (Maeda & Ogawa, 2014) ou pour le romanji après une lésion dans le gyrus frontal inférieur gauche (Ogura et coll., 2013). Ces dissociations fonctionnelles entre les deux SG peuvent être largement expliquées par leurs caractéristiques propres. Si la lésion touche des régions cérébrales impliquées dans le traitement lexical, le kanji sera plus impacté que le kana (Yokota et coll., 1990). Si la lésion altère la mémoire de travail impliquée dans la production de séquences de lettres, alors le kana sera plus impacté (Hashimoto et coll., 1998). Cependant, les kanjis et les kanas se différencient aussi du point de vue visuel et moteur. Les études de cas rapportés n'étudient pas finement les erreurs produites par les patients (pour un exemple chez le monographe, voir Rapp & Caramazza, 1997) pour permettre de cibler spécifiquement la composante perturbée chez les patients.

De façon intéressante, Nakamura et coll. (2002) ont enregistré l'activité cérébrale en IRMf chez un groupe de neuf bigraphes japonais pendant une tâche de dictée de mots kanjis et kana où les participants devaient soit écrire les mots, soit s'imaginer les écrire. Les auteurs ont comparé les deux systèmes graphiques pendant l'écriture effective et ont observé une activation plus forte pour le kanji que le kana dans le cortex temporal postérieur gauche, région très proche de la VWFA, confirmant son rôle particulier pour

l'écriture du kanji (voir aussi Ueki et coll., 2006). Cependant, pendant la tâche de rappel mental, cette région était activée pour les mots en kanji et en kana de la même façon. Les auteurs proposent donc que les patients lésés dans cette région utilisent une autre stratégie pour écrire correctement les kanas (la conversion directe du son en lettre). L'activation plus forte pour le kanji, spécifique à la condition d'écriture effective, pourrait venir de sa complexité visuo-motrice qui nécessiterait un maintien plus long de la forme visuelle des caractères kanji que pour les caractères kana pendant leur production. Cette étude suggère donc que l'écriture du kanji et celle du kana recrutent des réseaux cérébraux similaires, mais d'une façon différente selon les demandes inhérentes aux caractéristiques graphiques. Cependant, nous ne pouvons pas conclure quant à l'écriture de systèmes alphabétique ayant des lettres de complexités visuo-motrices comparables.

Une dissociation fonctionnelle dans la production graphique, non directement liée au bigraphisme mais qui a été davantage documentée est la dissociation entre les chiffres et les lettres. Les chiffres et les lettres ont des formes proches d'un point de vue visuel et moteur. Or, certains patients étaient incapables d'activer des programmes moteurs pour les lettres, mais présentaient une écriture préservée des chiffres (Anderson et coll., 1990; Delazer et coll., 2002 ; Starrfelt, 2007; Macoir et coll., 2011). Des études de neuro-imagerie ont par la suite confirmé des différences dans le traitement cérébral pour ces deux catégories de caractères (Longcamp et coll., 2014). Une explication à cette dissociation pourrait être le contexte d'acquisition, les chiffres étant généralement appris en relation étroite avec les doigts de la main (Anderson et coll., 1990). Alternativement, le contexte global d'utilisation pourrait expliquer la dissociation, car le patient décrit par Delazer et coll. (2002) était capable d'écrire le chiffre "0" mais pas la lettre "O". Certains auteurs affirment qu'il existe une différence dans la séquence des composantes du schéma moteur entre les lettres et les chiffres (Anderson et coll., 1990 ; Macoir et coll., 2011), ce qui est confirmé par les différentes durées et vitesses d'écriture pour les lettres et les chiffres (Longcamp et coll., 2014).

Enfin, à notre connaissance, seules deux études à ce jour ont rapporté une dissociation fonctionnelle entre l'arabe et un autre SG, à savoir le français (Boumaraf & Macoir, 2016) et l'hébreu (Ibrahim, 2009). Cependant, les déficits observés n'étaient pas exclusifs à la modalité écrite et n'étaient pas bien décrits ; elles suggèrent tout de même qu'une

dissociation fonctionnelle entre les deux SG est possible, dû à des processus différents mis en jeu.

Pour conclure, le débat sur l'universalité des processus de lecture et d'écriture et leurs substrats cérébraux n'est pas encore tranché. On note cependant que plusieurs études, qu'elles soient cliniques ou en neuroimagerie, apportent des arguments convaincants en faveur de dissociations entre SG, que ce soit en lecture ou en écriture. Cependant les études décrites comparent des systèmes qui diffèrent selon de nombreux facteurs pouvant expliquer la dissociation fonctionnelle.

4. Le système graphique arabe

Cette partie décrit le système graphique arabe, la langue étudiée lors de cette thèse. Nous rapportons des études qui décrivent les caractéristiques de l'écriture arabe et qui soulignent les enjeux à surmonter dans l'apprentissage de la littéracie arabe. Nous discutons également de la direction d'écriture de l'arabe qui s'oppose à celle de l'alphabet latin.

4.1. La langue arabe

L'arabe est la langue officielle de 25 pays. Dans les pays arabophones, on observe un phénomène de diglossie : il y a l'arabe parlé couramment (appelé dialecte ou arabe colloquial) qui varie selon la région géographique, avec deux principaux clusters : l'arabe dialectal du Moyen-Orient et celui du Maghreb. Parallèlement, il y a l'arabe littéraire (où MSA pour '*Modern Standard Arabic*') qui est utilisé lors des conversations formelles et pour l'écrit. Seul l'arabe littéraire a une forme écrite standardisée.

La diglossie peut être un frein à l'acquisition de la lecture. Les enfants de maternelle et de grade 1 (6 ans) ont plus de difficultés à isoler des phonèmes en MSA qu'en dialecte, car ils utilisent très peu cette langue à l'oral (Saiegh-Haddad, 2003 ; Saiegh-Haddad & Ghawi-Dakwar, 2017). Or, les aptitudes phonémiques sont une clé de la lecture. Chez les adultes, l'arabe littéraire est considéré comme une langue seconde à l'oral (Ibrahim & Aharon-Peretz, 2005). Une étude de Wagner et coll. (1989) a montré que pendant les cinq premières années d'apprentissage de l'écrit, la similitude entre le langage oral et le langage écrit est un avantage dans l'apprentissage. Lorsqu'un groupe d'enfants parlant l'arabe dialectal marocain était comparé à un groupe d'enfants parlant le berbère, apprenant l'arabe littéraire (plus proche de l'arabe dialectal que du berbère) du grade 1 à 5 (soit de 6 à 11 ans). Au grade 5 il n'y avait plus de différence entre les deux groupes.

A l'oral, l'arabe se distingue du français par deux points principaux :
- certains phonèmes n'existent qu'en arabe et d'autres qu'en français. Par exemple, en arabe il existe des phonèmes emphatiques qui sont similaires à des phonèmes « simples », pour lesquels on utilise les mêmes modes d'articulation mais de façon emphatique.

- en arabe, on distingue des voyelles brèves et des voyelles longues (c'est-à-dire que la prononciation de la voyelle est allongée). Il n'existe que trois voyelles (ا /â/ ; ي /î/ et و /ôû/) et celles-ci peuvent être brèves ou longues.

4.2. Caractéristiques du système graphique arabe

4.2.1. Aspects linguistiques :

A l'écrit, l'arabe est un système alphabétique de 28 lettres correspondant à des sons uniques. L'arabe est parfois considéré comme un système consonantique car les voyelles brèves ne s'écrivent que rarement. Les voyelles brèves ne sont pas des lettres mais des signes diacritiques que l'on écrit au-dessus ou en-dessous de la consonne précédant la voyelle. En plus des voyelles brèves, il existe trois autres signes diacritiques, donnant des informations phonologiques : le chadda (consonne doublée), le soukoun (consonne sans voyelle) et le tanwin (prononcé /n/ à la fin d'un mot indéterminé ; voir tableau 1). On parle alors de diacritiques phonémiques. Les voyelles brèves et les diacritiques phonémiques ne sont présentes que dans les livres pour enfants, les poésies et les textes religieux. On parle alors de textes voyellisés ou vocalisés. Elles peuvent également être présentes pour des noms propres ou s'il peut y avoir une ambiguïté sur le mot. Lorsque les voyelles brèves sont présentes, l'arabe est considéré comme transparent alors qu'il est opaque lorsqu'il est présenté sans (Abu-Rabia, 2002; Frost, 2012).

/A/ Fatha	/I/ Kasra	/OU/ Damma	Chadda	Soukoun	Tanwin
اَ	اِ	اُ	اّ	اْ	اً

Tableau 1 : Diacritiques correspondant aux voyelles brèves et à d'autres informations phonémiques. Le rond en pointillé représente la consonne à laquelle la diacritique s'applique.

Une caractéristique orthographique est que l'arabe est une langue à dérivation. Les mots sont composés d'une racine de 3 ou 4 consonnes qui donne la famille sémantique à laquelle appartient le mot et d'un schème qui peut contenir des voyelles longues et brèves et des consonnes et qui donne la catégorie sémantique (e.g. participe actif, participe passif, lieu de l'action etc., voir tableau 2).

racine	écrire	livre	librairie	écrivain	bureau
ك ت ب	كَتَبَ	كِتَاب	مَكْتَبَة	كَاتِب	مَكْتَب

Tableau 2 : Exemple de la racine « ka-ta-ba » écrit avec les diacritiques.

4.2.2. Aspects de forme graphique :

L'écriture arabe est « semi-cursive » ; dans un mot chaque lettre s'attache à la suivante à l'exception de 8 lettres qui ne s'attachent pas. Il y a donc des mots dits connectés (composés uniquement de lettres qui s'attachent : خبز), des mots semi-connectés (composés de lettres qui s'attachent et qui ne s'attachent pas : تشاي) et des mots non-connectés (dont toutes les lettres ne s'attachent pas : درس).

Comme c'est une écriture semi-cursive, la plupart des lettres vont changer de forme pour pouvoir s'attacher les unes aux autres. Les lettres vont donc avoir une forme lorsqu'elles sont isolées, lorsqu'elles sont en position initiale, médiane ou finale. Ces formes peuvent être similaires ou très proches (ط ط ط / ت ت ت) mais elles peuvent aussi être visuellement très différentes (ع ع). Chaque lettre possède donc différents allographes qui doivent être utilisés selon la lettre qui précède et celle qui suit. En arabe, il n'existe pas de majuscules. Contrairement à l'alphabet latin, pour lequel on peut définir avant d'écrire dans quel allographe on va le faire (on peut par exemple décider d'écrire en MAJUSCULES), la sélection allographique ne peut donc se faire en arabe comme une pré-sélection globale comme l'a proposé van Galen (1990), mais doit être calculée pour chaque lettre indépendamment, en tenant compte de la lettre qui la précède et de celle qui la suit.

La plupart des lettres arabes partagent leur forme avec au moins une autre lettre. Les lettres se différencient alors par la présence ou l'absence de points à différentes positions. Par exemple, la forme basique ح écrite sans point correspond à la lettre ha, ح à la lettre kha et ج à la lettre jim.

Enfin, contrairement au système basé sur l'alphabet latin, l'arabe se lit et s'écrit de droite à gauche. Cette direction a probablement pour conséquence une inversion du sens de rotation dans lequel sont tracées les boucles, qui sont majoritairement formées dans le sens horaire chez des arabophones, alors qu'elles sont tracées dans le sens anti-horaire pour l'alphabet latin (Fagard & Dahmen, 2003 ; Goodnow et coll., 1973). De plus, les mouvements réalisés pour produire les lettres arabes seraient davantage dans la direction droite-gauche que gauche-droite (van Sommers, 1984).

4.2.3. Comparaison de l'arabe et autres système alphabétiques

4.2.3.1. Sur le plan perceptif

Selon certains auteurs, les caractéristiques décrites ci-dessus (différentes formes des lettres, cursivité, diacritiques...) complexifieraient la reconnaissance des caractères et entraîneraient une charge visuelle pendant la lecture de l'arabe. En effet des auteurs ont montré que la lecture de pseudo-mots était plus longue chez un groupe de locuteurs d'arabe par rapport à un groupe de locuteurs d'hébreu, eux-mêmes plus longs qu'un groupe de locuteurs d'anglais (Eviatar & Ibrahim, 2004). De façon intéressante, des adultes de langue maternelle arabe répondaient plus rapidement dans une tâche de décision lexicale lorsqu'elle était faite en hébreu (leur langue seconde) que lorsqu'elle était faite en arabe. Lorsque la tâche était faite à l'oral, les participants répondaient plus rapidement quand les mots étaient dans leur langue maternelle, l'arabe, que dans leur langue seconde, l'hébreu (Ibrahim, 1998 cité dans Ibrahim et coll., 2007). De plus, Roman et Pavard (1987) ont utilisé l'enregistrement oculomoteur chez des bigraphes

français/arabe et ont vu que les temps de fixation par mot étaient plus longs en arabe (342ms) qu'en français (215ms). Ces résultats ont été répliqués chez des enfants au niveau de la reconnaissance d'un signe diacritique dans des mots et pseudo-mot arabes et hébreux (Abdelhadi et coll., 2011) ou encore dans la lecture d'un texte (Ibrahim et coll., 2007).

Au niveau de la lettre, on peut se demander si les composantes visuelles efficaces pour l'identification des lettres latines sont les mêmes que celles pour les lettres arabes. Revenons sur l'étude de Wiley et coll. (2016) où des experts arabe devaient juger la similarité visuelle d'une paire de lettres et dont nous avons déjà discuté l'influence de la similarité motrice sur le temps de réponse et le taux d'erreurs. Les auteurs ont utilisé 14 composantes décrites sur les langues latines (dont notamment les 10 composantes décrites par Fiset et coll. (2008) présentées au début du cadre théorique) auxquelles ils ont ajouté une composante saillante pour l'arabe : la présence de points. Ils ont ensuite pu classer par ordre d'importance les composantes. Ils ont ainsi montré que la présence des points était la composante la plus efficace pour discriminer les lettres arabes. Le nombre de terminaisons, fort prédicteur pour les lettres latines (Fiset et coll., 2006) était également une variable déterminante pour l'arabe. En réalité cette étude comportait un autre groupe de novices en arabe qui réalisaient la même tâche (chez eux la similarité motrice n'était évidemment pas explicative du temps de réaction puisqu'ils ne savaient pas écrire les lettres). De façon intéressante, la cyclicité (c'est-à-dire la répétition, comme la répétition d'un trait par exemple) et la présence de lignes horizontales étaient plus importantes pour les novices que pour les experts. Selon les auteurs, chez les experts ces composantes pourraient ne pas être privilégiées pour reconnaître les lettres car, en condition de lecture habituelle de textes arabes, où les lettres sont liées entre elles comme en écriture manuscrite, ces deux composantes sont omniprésentes (cf figure 20).



Figure 20 : Exemple d'un mot arabe montrant l'importance des lignes horizontales et de la cyclicité dans un mot arabe. Extrait de Wiley et coll., 2016).

L'étude de Wiley et coll. (2016) signifie que pendant l'apprentissage simultané des lettres arabes et françaises, les enfants vont devoir apprendre à focaliser leur attention sur différentes composantes en fonction du système graphique. Si l'apprentissage de l'arabe se fait plus tardivement, l'enfant aura sûrement tendance à utiliser, en partie, les composantes développées pour son système maternel. C'est ce qu'observe les auteurs pour la composante « ligne horizontale », qui est pertinente pour les lettres latines, est utilisée par les non-experts comme variable pertinente pour les lettres arabes.

4.2.3.2. Sur le plan perceptif

En ce qui concerne l'acquisition de l'écriture en arabe, il y a peu de données. Des auteurs, principalement Libanais, s'intéressent depuis quelques années à la bigraphie car la plupart des Libanais sont bigraphes et sont confrontés très tôt aux deux alphabets, arabe et latin. (Abizeid et coll. (2016) ont fait réaliser le BHK et le STAKIA (deux tests standardisés permettant de mesurer la qualité et la rapidité de l'écriture, en français et en arabe) à des enfants du CP au CM2 (6 à 10 ans) libanais, bigraphes arabe/français ayant commencé à apprendre les deux SG dès l'âge de 5 ans. En français, les enfants bigraphes libanais étaient plus rapides que les enfants monographes français de même âge et même classe. Cet effet a été expliqué par un entraînement accru dans deux systèmes graphiques, qui optimiserait le contrôle moteur pour l'écriture. De façon intéressante, les enfants bigraphes écrivaient plus rapidement en français qu'en arabe, du CP au CM2. Selon les auteurs cette différence peut être expliquée soit par l'exposition plus fréquente au système latin par rapport au système arabe, soit par les caractéristiques de l'écriture arabe et ses nombreux levers (à cause des points) qui pourraient ralentir l'écriture (Abizeid et coll., 2016). En outre, l'écriture des enfants libanais était de meilleure qualité que celle des enfants français en CP. L'inverse était observé du CE1 au CM2 (Abizeid et coll., 2017). Il est donc possible que les différences motrices entre l'arabe et le français qui s'opposent de par leur direction d'écriture, entraînent des conflits moteurs qui impactent la forme de l'écriture (Younes et coll., 2016 ; Younes et coll., 2018).

Une étude récente (Younes-Harb, en préparation) s'intéresse justement à la possible présence de conflits moteurs chez les bigraphes arabe/français. Les auteurs ont étudié

l'écriture en copie de mots arabes par un groupe de Syriens (monographes en arabe) et un groupe de Libanais bigraphes arabe/français. Ils ont également étudié la copie de mot français écrits par le même groupe de Libanais et un groupe de monographe français. Le but était de tester si les indices graphomoteurs variaient pour une même langue selon qu'elle était écrite par des monographes ou des bigraphes, donc d'identifier un « accent » à l'écrit. Les auteurs n'ont pas observé de différences massives dans l'écriture des mots arabes par les Syriens et les Libanais. En revanche, en français, les Libanais présentaient une écriture différente par plusieurs aspects de celle des Français. Elle était en particulier plus étirée sur l'horizontale. Pour les auteurs, la pratique simultanée de l'écriture arabe et latine a permis aux Libanais de développer un mode de contrôle moteur particulier approprié pour écrire dans les deux sens, malgré des contraintes biomécaniques très différentes.

Objectifs

Ce travail de thèse comportait deux axes d'études, questionnant le rôle de la sensori-motricité dans l'écriture des lettres.

La première thématique, qui est à l'origine de cette thèse, concerne le rôle cognitif que la sensori-motricité utilisée pendant l'apprentissage de l'écriture, peut jouer dans la connaissance des caractères alphabétiques. Cette question a suscité une recherche à la fois appliquée (en sciences de l'éducation) et fondamentale (en sciences cognitives) qui fait l'objet de la première partie expérimentale présentée dans ce qui suit. Dans cette expérimentation, nous allons comparer l'apprentissage par des élèves débutants d'une nouvelle langue, l'arabe, qui sera écrite, soit à la main, soit au clavier. Cette expérimentation s'est déroulée en contexte scolaire pendant trois années consécutives.

La seconde thématique, plus fondamentale (neurosciences cognitives), concerne les questions de l'équivalence des systèmes graphiques et de leur coexistence chez un même individu. Elle découle de la première, puisque les élèves qui débutent l'apprentissage de l'arabe à l'écrit vont devenir à terme bigraphes. Quelles sont les réorganisations cérébrales qui vont résulter de cette coexistence chez ces élèves en cours d'apprentissage ? Avant d'étudier cette question chez les élèves, et compte tenu du manque de données sur la langue arabe en général, et sur la bigraphie arabe/française en particulier, nous avons pris le parti d'étudier les corrélats neuronaux de la bigraphie arabe/française chez l'expert. Dans la deuxième expérimentation, conduite en laboratoire en utilisant l'IRMf, nous examinerons les réponses cérébrales associées à l'écriture de caractères arabes et latins chez ces experts bigraphes. L'objectif de cette expérimentation était de déterminer dans quelle mesure L'objectif de cette étude est de définir si l'arabe et le français, dont les lettres diffèrent d'un point de vue moteur, sont associés à une spécification fonctionnelle de populations neurales pendant leur écriture.

Partie Expérimentale 1 :

Le projet ARABESC : Apprendre l'arabe au stylo ou au clavier ?

Publication :

Fabiani, E., Baddour, Z., Tsao, R., Danna, J., Longcamp, M. & Velay, J.L. *Learning to write Arabic by hand or keyboard: a longitudinal study in beginning French middle school students.*, en preparation.

Communications orales :

Fabiani, E. & Velay J.-L., *L'apprentissage de la langue arabe au regard des neurosciences cognitives*. Colloque du GIS Moyen-Orient et Mondes Musulmans, juin 2021, Aix en Pce.

Fabiani, E., Tsao, R., Baddour, Z., Longcamp, M., Danna, J., Leydet, J.L., Maurel, O. & Velay, J.L. *Apprendre à écrire l'arabe avec des tablettes numériques : manuscrit ou clavier?*. Symposium international sur la littéracie à l'école - SILE 2021, 6 et 7 mai 2021, en ligne.

Fabiani, E. *Projet ARABESC : Apprendre à écrire l'arabe au stylo ou au clavier?*. Conseil Académique Pédagogique : Le numérique pour une "société apprenante". Comment le numérique est-il au service des apprentissages ?"- Rectorat Aix-Marseille, 11 avril 2018

Introduction

Cette étude a été élaborée en partenariat avec le rectorat de l'académie d'Aix-Marseille, plus particulièrement avec Mme Rachida Dumas (Inspectrice d'Académie et Inspectrice Pédagogique Régionale d'arabe), Mrs Jean-Louis Leydet et Olivier Maurel (respectivement directeur et sous-directeur du service régional académique du numérique éducatif).

L'étude

L'objectif de cette étude était de comparer l'efficacité de deux méthodes d'apprentissage du système graphique arabe basées sur deux pratiques d'écriture : à la main et au clavier. Dans tout ce qui suit, nous parlerons d'*apprentissage différencié* pour évoquer la comparaison entre apprentissage de l'écriture à la main et au clavier. L'étude a été réalisée sur le terrain, au collège pendant les cours d'arabe. Soixante-douze élèves ont été suivis pendant deux années scolaires (6^{ème} et 5^{ème}) mais comme ils ont commencé en décalage sur deux années scolaires successives, l'étude s'est déroulée sur 3 années scolaires (2018 – 2021). L'apprentissage différencié a été réalisé en 6^{ème} où deux classes ont écrit sur tablettes numériques avec le clavier (groupe CLA pour clavier) et deux classes ont écrit sur tablettes numériques avec le stylet (groupe MAN pour manuscrit). En 5^{ème}, les élèves sont tous revenus à un enseignement « traditionnel » sans outils numériques, c'est-à-dire à l'écriture manuscrite papier/crayon. Les cours d'arabe ont été réalisés par le même enseignant pour les quatre classes et s'inscrivaient dans le parcours scolaire des élèves, qui suivaient l'arabe en langue optionnelle à raison de 3h/semaine. L'enseignant avait deux classes de 6^{ème} et deux classes de 5^{ème} chaque année. Les quatre classes expérimentales appartenaient à 2 promotions successives : deux classes ont commencé en 6^{ème}, en septembre 2018 (promotion 1), et les deux autres classes ont commencé en 6^{ème} en septembre 2019 (promotion 2). Chaque année, une classe écrivait au clavier et l'autre au stylet. Pendant la 6^{ème} et la 5^{ème}, le niveau en écriture et lecture de l'arabe des élèves était mesuré à l'aide d'une batterie de tests qui devait être réalisée en début, milieu et fin de chaque année scolaire. Cependant, l'arrêt des cours à la suite de

l'urgence sanitaire due à la propagation du Covid-19 a perturbé l'organisation initialement prévue en réduisant la durée de l'étude qui comporte finalement une mesure en pré-test (T0), une mesure après six mois d'apprentissage différencié (T1) et une mesure après six mois de retour à un apprentissage traditionnel (T2).

Au départ, il était également prévu dans ce projet de comparer ces deux modes d'apprentissage à un troisième, un groupe contrôle suivant un enseignement traditionnel (papier-stylo). Cependant, l'enseignant du projet n'avait que deux classes et n'a plus donné cours en 6^{ème} en 2020-2021 (réduction de son volume horaire pour pouvoir présenter le CAPES), nous avons donc dû abandonner le principe d'un groupe contrôle papier-stylo.

Le contexte

Cette étude a été réalisée au sein du collège Saint Mauront, collège privé catholique sous contrat d'association avec l'Etat. Cependant, l'établissement accueille entre 80 et 90% d'enfants de confession musulmane (Hors-série d'ECA, paru en mai 2016). Les élèves participant au projet sont majoritairement issus de familles arabophones et baignent dans la langue et la culture arabe, au collège et en dehors. Ce collège privé sous-contrat, très atypique, a fait l'objet d'un ouvrage publié récemment qui regroupe des témoignages d'élèves, de parents, et nombre d'expériences d'enseignants ayant travaillé ou travaillant toujours au collège (Chamoux, 2019). Le quartier de Saint-Mauront est situé dans le 3^{ème} arrondissement de Marseille. En 2015, le taux de pauvreté monétaire (c'est-à-dire le pourcentage de personnes vivant en dessous du seuil de pauvreté, fixé à 60% du niveau de vie médian) de cet arrondissement était le plus élevé de Marseille : entre 49% et 54% (alors qu'il est de 26.1% sur l'ensemble de la ville et de 14.9% sur l'ensemble de la France métropolitaine ; Dossier thématique du Centre Communal d'Action Sociale de Marseille, 2018).

Le collège possède deux classes par niveau et propose l'enseignement de l'arabe en option de la 6^{ème} à la 3^{ème}. L'enseignant d'arabe du collège Saint Mauront (M. Zoubir Baddour) et le chef d'établissement en fonction lors de la mise en place du projet (M. Cédric Coureur) se sont montrés très enthousiastes vis à vis de cette expérimentation.

1. Méthodes

1.1. Participants

L'expérimentation a été réalisée dans 4 classes : Deux classes ont suivi l'apprentissage en 2018-2019 (promo1) et les deux autres classes en 2019-2020 (promo2). Chacune de ces deux années, une des deux classes a utilisé comme outil la tablette et le stylet et a écrit de façon manuscrite (groupe MAN, promo1 n=18 et promo2 n=19) et l'autre a utilisé comme outil la tablette et le clavier virtuel (groupe CLA, promo1 n=21 et promo2 n=14).

Au total, sur les 3 années de durée de l'étude, le groupe MAN se composait de 37 élèves d'âge moyen au début de l'étude 11.3 ans (21 filles et 2 gauchers). Le groupe CLA se composait de 35 élèves d'âge moyen au début de l'étude 11.3 ans (22 filles et 3 gauchers). La première partie des résultats que nous présentons ensuite décrit le niveau en français et en arabe des élèves au début de l'étude. Après l'analyse des résultats, deux élèves du groupe MAN de la promotion 1 n'ont pas été pris en compte car ils connaissaient déjà l'ensemble des lettres arabe en pré-test. Trois élèves du groupe MAN de la promotion 2 ont également été enlevés de l'analyse car ils n'ont montré aucune évolution entre le pré-test et les post-tests, à cause d'une absence d'implication, à la fois dans le cours d'arabe et dans les sessions de tests. Les deux groupes ont été appariés sur le niveau initial en littératie du français et de l'arabe (voir partie 1 des résultats).

1.2. Méthode d'apprentissage

L'apprentissage s'est fait lors des cours d'arabe (à raison de 2 fois 1h1/2 par semaine) tout au long de l'année. Le contenu du cours était celui habituellement donné par l'enseignant d'arabe. Selon le programme des collèges langues vivantes étrangères au palier 1 pour l'arabe (2005), l'apprentissage du système graphique doit se faire dès le début de l'année et ne doit pas se prolonger au-delà des vacances d'hiver. Concernant la graphomotricité, il est écrit que l'élève doit apprendre à tracer le « ductus consonantique » d'un seul trait, de droite à gauche (et revenir en suite pour placer les

points et autres signes diacritiques). Le terme ductus correspond aux mouvements de tracé des lettres. Le ductus consonantique est à comprendre comme le ductus de l'ensemble du mot, car en arabe seule les consonnes (et les trois voyelles longues) sont représentées par des lettres (voir introduction générale). Il est recommandé de ne pas écrire les signes diacritiques de vocalisation, pour favoriser l'apprentissage du principe des schèmes et des racines, morphologie et syntaxe. Concernant la lecture, le programme ne mentionne pas de décodage.

L'enseignement de l'arabe a été fait à partir du manuel 'Kullo Tamâm' palier 1 (Tahhan, 2005). Le manuel comprend dix unités ; l'étude d'une unité peut s'étaler sur deux semaines et demie à trois semaines. Chaque unité se décompose en 3 parties : 1. Dialogue : écoute d'un dialogue et répondre à des questions de compréhension, 2. Grammaire et lexique : par exemple, compléter des phrases avec le prénom personnel qui convient, 3. Système graphique : par exemple, entourer une lettre cible dans des mots, écrire une lettre sous sa forme attachée dans des mots, assembler ou décomposer des mots. Les quatre premières unités présentent les lettres arabes en groupe, des plus fréquentes au moins fréquentes (voir tableau 3).

Unité	Lettres
1	ب - ا - س - م - ن - ي - ل - أ - ة
2	ت - د - ر - و - ي - ف - ع - ج - ك
3	ه - ط - ش - ذ - ص - ح
4	ز - خ - ض - ق - ث - غ - ظ

Tableau 3 : Lettres arabes travaillées en fonction des unités du manuel.

Habituellement, l'enseignant distribue les exercices imprimés, que les élèves collent dans leur cahier, et il projette ces exercices sur le tableau. Pour les exercices de compréhension du dialogue, de grammaire et lexique, les consignes sont lues par l'enseignant et un exemple est donné. Puis, chaque question est lue par l'enseignant et les

élèves y répondent à l'oral. L'enseignant écrit alors les réponses au tableau avec un marqueur et les élèves recopient la réponse sur le document collé dans leur cahier. Pour les exercices sur le système graphique, l'enseignant montre quelques exemples au tableau et les élèves effectuent les exercices dans leur cahier. L'enseignant corrige les réponses au tableau et les élèves peuvent se corriger sur leur document. A la fin de chaque unité, l'enseignant effectue un contrôle portant sur les notions travaillées. A la fin de chaque semestre, l'enseignant note les cahiers des élèves. C'est ce mode d'enseignement « traditionnel » qu'ont reçu les élèves en 5^{ème}, après avoir reçu pendant l'année de 6^{ème} l'apprentissage numérique différencié (stylet ou clavier).

1.2.1. Outils numériques

Le collège Saint Mauront (comme tous les collèges du département des Bouches du Rhône), a été doté d'une tablette LENOVO MIIX 320-10ICR 10.1" par élève. Cependant, ces tablettes ne permettent pas d'écrire de façon manuscrite correctement car la fréquence d'échantillonnage de l'écran tactile est trop faible (trait saccadé, délai entre la réalisation du mouvement et l'apparition de la trace...). De plus, elles ne sont pas équipées de stylet. Pour l'expérimentation, les élèves ont utilisé des tablettes Samsung Galaxie Book 10 10.6" avec S-pen sous Windows 10, achetées sur le budget du projet ARABESC. Les tablettes étaient nominatives, distribuées aux élèves au début du cours et récupérées à la fin. Entre les cours, les tablettes étaient conservées dans une valise de rangement spéciale pour tablettes (Naotic), branchée sur le secteur électrique, dans laquelle elles se rechargeaient après leur utilisation. Cette valise était elle-même placée dans un local fermé du collège.

Un partenariat établi entre l'Académie Aix-Marseille et Microsoft permet également à chaque élève de disposer d'un compte Microsoft office365 en ligne, incluant la suite bureautique de Microsoft. Dans cette suite, l'application OneNote permet d'écrire sur des pages vierges et d'annoter des documents de type PDF, avec le stylet ou le clavier numérique. OneNote peut être associée à Onedrive, l'espace de stockage en ligne de Microsoft. Les documents sont parallèlement stockés dans l'espace de stockage et peuvent être accessibles et modifiables par différents utilisateurs. Microsoft a développé une version de OneNote « pour la classe » qui permet à un enseignant de créer chez lui un

espace de classe virtuelle où chaque élève possède son propre espace. Il peut ainsi déposer des documents dans l'espace de chaque élève. En classe, grâce à la connexion Wifi, les tablettes se 'synchronisent' avec l'espace de stockage et les élèves peuvent annoter ou compléter ces documents depuis leurs tablettes.

La synchronisation consiste à mettre à jour les documents de la tablette en fonction des modifications apportées (par l'enseignant) sur ceux qui sont dans l'espace de stockage et de mettre à jour ceux qui sont dans l'espace de stockage en fonction des modifications effectuées (par l'élève) sur la tablette. La synchronisation se faisait de façon automatique au début du cours et permettait donc à l'enseignant de voir depuis sa tablette le travail réalisé par l'élève, et à l'élève de voir la correction de l'enseignant et les nouveaux exercices sur sa tablette. Ainsi, de la même façon que dans l'apprentissage traditionnel l'enseignant distribue des feuilles d'exercices à coller dans le cahier, il peut « distribuer » une version numérisée de la feuille dans l'espace de chaque élève, qui la trouvera en ouvrant l'application. Une illustration de l'environnement de OneNote pour la classe est présentée sur la figure 21.

Les exercices habituellement utilisés par l'enseignant ont donc été numérisés.

Pour le groupe MAN, les documents ont été scannés en PDF et définis en tant qu'arrière-fond sur des pages blanches dans OneNote, ce qui permettait d'écrire aisément avec le stylet (pas de risque de modifier la mise en page, pas de sélection automatique d'objet...).

Pour le groupe CLA, les documents images n'étant pas adaptés pour l'écriture au clavier (mauvais placement du curseur, sélection de l'arrière-plan...), ils ont donc été recopiés/tapés sur des pages blanches dans OneNote, ce qui permettait d'écrire plus aisément avec le clavier. Malgré cette différence, les deux documents étaient visuellement très proches (voir figure 21 et 22).

11. Qui dit quoi ? Rappelle-toi qui a prononcé chacune de ces phrases (dialogue n° 2, CD page 4).

» نعم، أشرب كأس معك: سلوى ✓

» أرجع إلى الدار: أمينة ✓

» أنتظر أمينة: سلوى ✓

» يا الله يا شباب، إلى الكافتريا ! : نبيل ✓

A

11. Qui dit quoi? Rappelle-toi qui a prononcé chacune de ces phrases (dialogue n°2, CD page 4).

"نعم، أشرب كأس معك": سلوى

"أرجع إلى الدار": أمينة

"أنتظر أمينة": سلوى

"يا الله يا شباب، إلى الكافتريا !": نبيل

B

Figure 21 : Exemple d'un exercice réalisé par un élève du groupe MAN (A) et par un élève du groupe CLA (B). On peut constater que la présentation est la même, seule la modalité d'écriture des réponses est différente (les réponses sont surlignées en jaune sur la figure). On peut voir en rouge à droite la correction de l'enseignant.

Les deux groupes ont donc fait les mêmes exercices, seule la modalité d'écriture variait. En début d'année, une séance de cours a été entièrement dédiée à la présentation aux élèves des objectifs de l'étude et des modalités d'utilisation des tablettes et de l'application OneNote.

Pour faire cours en classe numérique, l'enseignant avait recours à un vidéoprojecteur et afin que les élèves aient la même configuration des exercices que celle projetée au tableau, il utilisait également la même tablette et la même application que les élèves. Il projetait la page d'exercice en cours, vide et qu'il remplissait au fur et à mesure du cours.

Comme L'enseignant qui a participé à ce travail pendant les 3 années n'avait jamais enseigné avec des tablettes numériques, il a été accompagné tout au long des deux années

d'apprentissage différencié par un expérimentateur qui était présente pour la quasi-totalité des cours, afin de résoudre d'éventuels problèmes techniques. L'environnement de la classe dans OneNote a été créé par les expérimentateurs. Cet outil lui a été présenté au début de l'étude et les expérimentateurs étaient présents pour répondre à ses questions pendant toute la durée de l'étude.

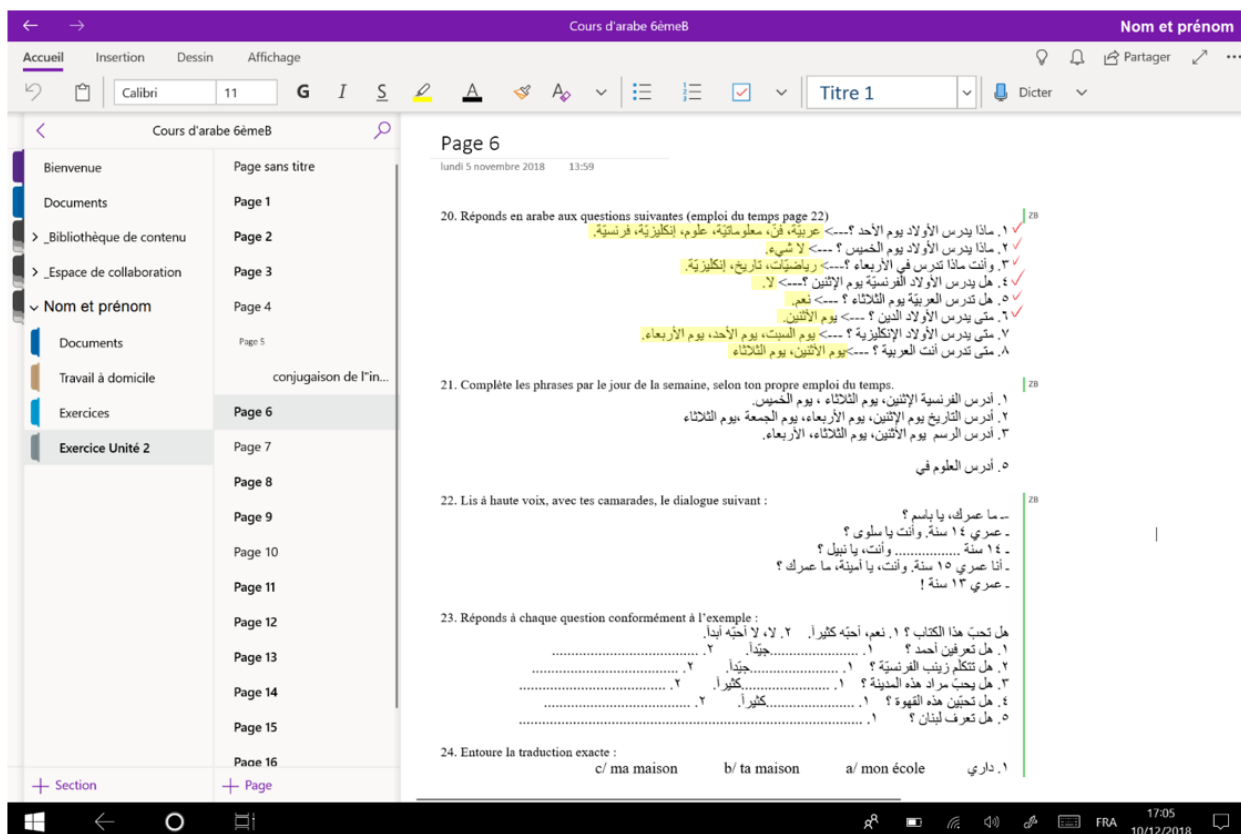


Figure 22 : Exemple d'une page d'exercice réalisé au clavier, ouverte dans l'application OneNote pour la classe. L'élève a répondu aux questions de l'exercice 20 (surligné en jaune sur la figure) et cet exercice a été corrigé par l'enseignant (en rouge à droite).

Utilisation des outils numériques : classe pilote

Avant de commencer l'expérimentation proprement dite, en septembre 2018, nous avons prétesté l'utilisation des tablettes numériques pendant le cours d'arabe dans une classe de 6^{ème} de février 2018 à juin 2018. Les élèves écrivaient de façon manuscrite sur des tablettes Samsung Galaxy Tab A P550 avec S-pen 9.7" sous Android dans l'application OneNote. Ces tablettes avaient été fournies par un partenaire privé de l'étude (la société

BIC). Finalement, ces tablettes n'ont pu être utilisées pour l'expérimentation pour deux raisons :

- Les applications Microsoft sous Android n'ont pas un fonctionnement optimal (par exemple sous Android, OneNote ne peut être utilisé avec le clavier arabe car les lettres s'affichent de la gauche vers la droite (comme pour le français).
- La société Samsung a arrêté la commercialisation des tablettes Samsung Galaxy Tab A P550 avec S-pen 9.7" pendant cette période de mise en place de l'étude.

Pour ces deux raisons, l'expérimentation a été réalisée avec des tablettes comparables Samsung Galaxie Book 10 10.6" avec S-pen, mais fonctionnant sous Windows.

1.2.2. Spécificités du groupe manuscrit

L'enseignant écrivait avec un marqueur les réponses au tableau. Les élèves écrivaient /recopiaient sur leur tablette avec le stylet (figure 23).

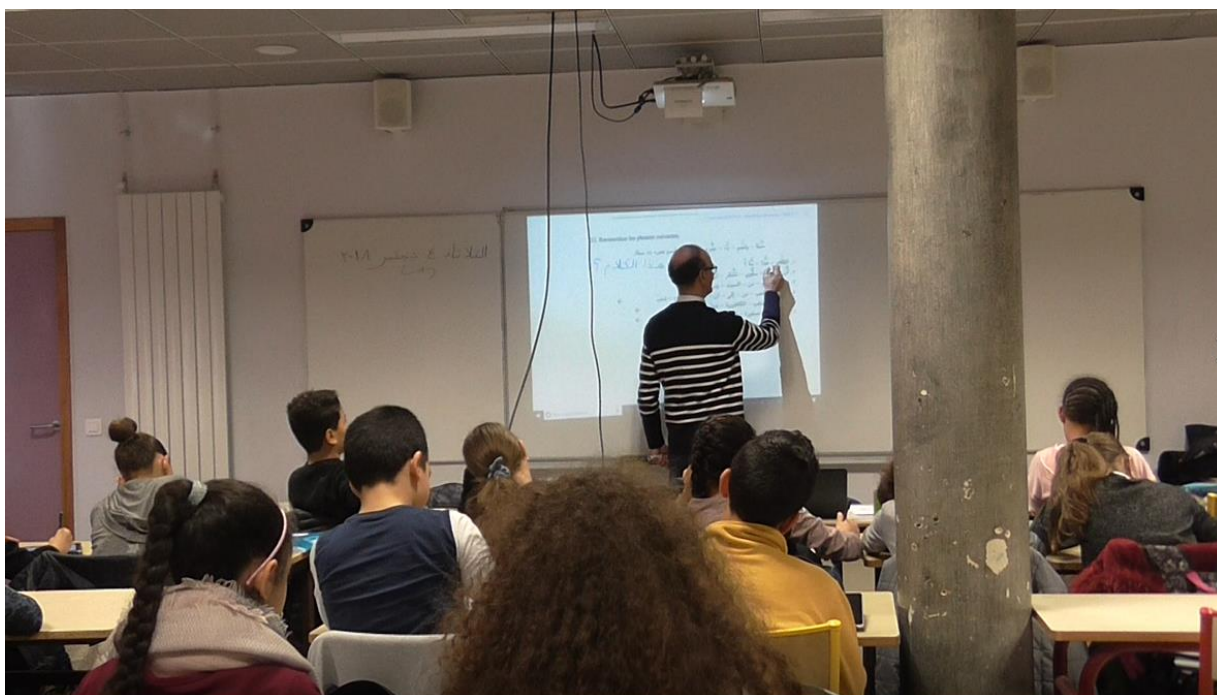


Figure 23 : Illustration du dispositif utilisé pour les classes du groupe MAN. On peut voir que l'exercice est projeté au tableau sur lequel l'enseignant écrit la réponse.

1.2.3. Spécificité du groupe clavier

Comme présenté en introduction, la forme visuelle des lettres arabes change selon leur position dans le mot (au début, au milieu ou à la fin, après une lettre qui s'attache ou qui ne s'attache pas). De la même façon que sur les claviers dédiés aux langues basées sur l'alphabet latin les lettres sont représentées en majuscules d'imprimerie, sur le clavier arabe standard elles sont représentées par leur forme isolée. Pour recopier au clavier un mot écrit en attaché, il faut donc connaître la forme isolée associée aux lettres composant le mot (figure 24). Lorsque la première lettre du mot est frappée, elle apparaît à droite de l'écran dans sa forme isolée. Lorsque la seconde lettre est frappée, plusieurs cas sont possibles : si la première lettre ne s'attache pas, la seconde apparaît également sous sa forme isolée à gauche de la première, qui ne se modifie pas. Cependant si la première lettre est une lettre qui s'attache, en frappant la seconde lettre, la première va automatiquement changer de forme et s'afficher sous sa forme attachée de début de mot. La seconde lettre, qui vient d'être frappée, apparaît alors attachée à la première et dans sa forme finale, comme si elle terminait un mot de deux lettres. Lorsqu'une troisième lettre est frappée, la même opération se produit. Si la seconde lettre est une lettre qui ne s'attache pas, elle ne se modifie pas et la troisième lettre apparaît dans sa forme isolée. En revanche, si la seconde lettre est une lettre qui s'attache, elle passe automatiquement de sa forme finale à sa forme attachée en milieu de mot et la troisième lettre apparaît sous sa forme finale. Ce processus se poursuit ainsi jusqu'à la dernière lettre du mot (figure 24).



Figure 24 : Gauche : exemple du mot « مدرسة » (« madrasa », école) et des touches à frapper pour l'écrire. Les numéros correspondent à la séquence de lettres (de la droite vers la gauche). A droite, les lettres affichées à l'écran au fur et à mesure des frappes. On peut voir que les lettres 1 et 4 s'attachent en changeant de forme lorsque la lettre suivante est frappée. Les lettres 2 et 3 ne changent pas de forme lorsque la lettre suivante est frappée et ne s'attachent pas à celle-ci (il y a un espace entre les deux lettres).

Pendant les cours, l'enseignant écrivait les réponses avec le clavier de sa tablette et les réponses s'affichaient au tableau grâce au vidéoprojecteur (figure 25). Pour aider les élèves à recopier les mots, l'enseignant projetait également son clavier en bas du tableau et montrait où se trouvait la lettre isolée à frapper pour produire la lettre liée que les élèves ne trouvaient pas. Il donnait parfois en même temps le nom de la lettre ou insistait sur une caractéristique visuelle de la lettre (par exemple « c'est celle qui a trois points au-dessus »). Lorsque plusieurs lettres posaient un problème aux élèves, il écrivait au marqueur au tableau sous le mot, les lettres à frapper dans leur forme isolée. L'écriture prenait donc plus de temps et l'enseignant était parfois amené à réduire la longueur des phrases à écrire lorsqu'elles étaient trop longues.

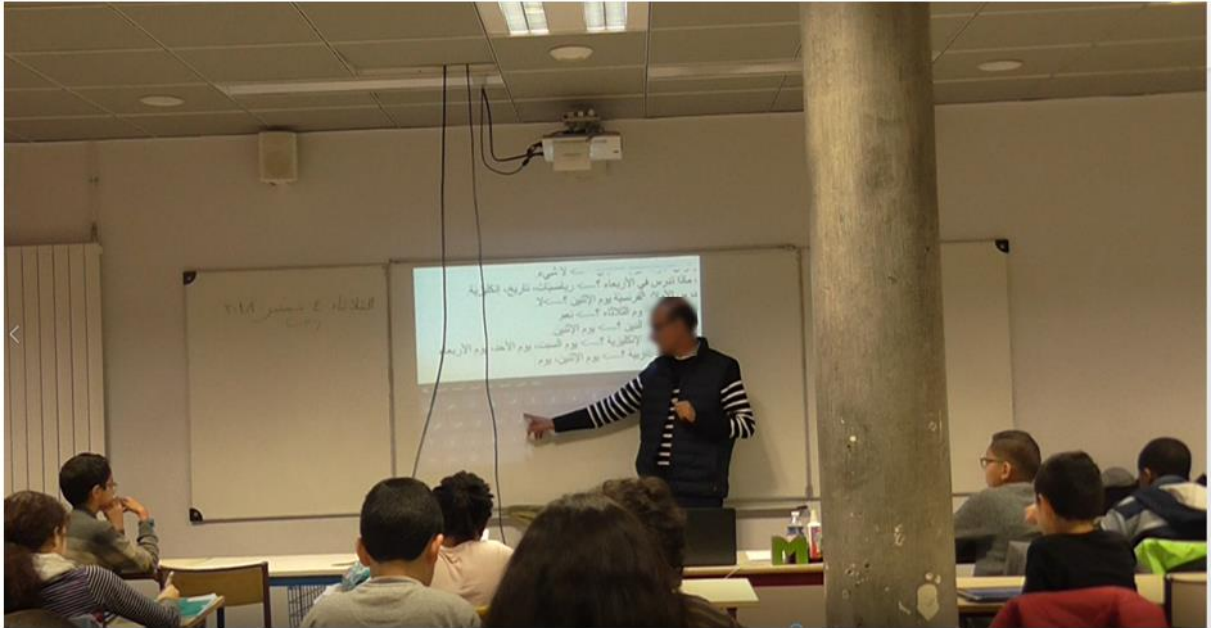


Figure 25 : Illustration du dispositif utilisé pour les classes du groupe CLA. On peut voir que l'exercice et le clavier sont projetés au tableau et que l'enseignant pointe la position d'une touche sur le clavier.

1.3. Evaluations et déroulement de l'étude

Le niveau des élèves en lecture et écriture de l'arabe a été évalué pendant des séances de cours dédiées, à différents moments de l'apprentissage. Les évaluations ont été faites en classe entière, ou en demi-classe, et duraient 1h à 1h30 selon les sessions. Les élèves ont réalisé les tests individuellement. Lors des évaluations, l'enseignant et au moins 3 expérimentateurs étaient présents afin d'aider et de surveiller les élèves.

Chaque année (6^{ème} et 5^{ème}) devait comprendre 3 sessions de tests : en début, milieu et fin d'année (figure 26, haut). Cependant, l'arrêt des cours en présentiel en 2020 et en 2021 consécutif à la situation d'urgence sanitaire créée par la propagation de la Covid-19, a perturbé le planning des sessions de tests initialement prévu (figure 26, bas).

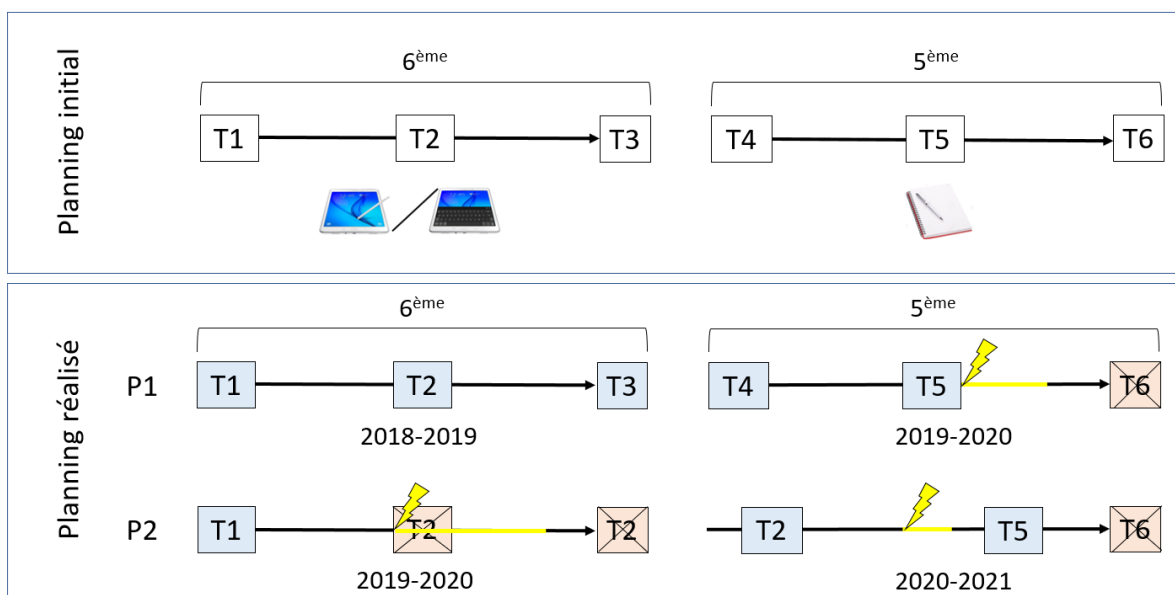


Figure 26 : Haut : déroulement initialement prévu des évaluations des élèves sur les 2 années scolaires de 6^{ème} et de 5^{ème} (T = session de tests). Bas : déroulement de l'étude effectivement réalisée (P = promotion, le symbole 'éclair' marque le début de l'arrêt des cours, partie jaune=arrêt des cours, en bleu = sessions de tests réalisées et exploitables, en rosé = sessions de tests non réalisées ou non exploitables).

1.3.1. Apprentissage différencié

Pour la promotion 1 (2018-2019), les 3 sessions de tests en 6^{ème} ont pu être réalisés (T1, T2 et T3). Cependant, pour la promotion 2 (2019-2020), les cours en présentiel ont été arrêtés du 16 mars au 11 mai (et jusqu'à la fin de l'année pour une partie des élèves). Les tests de milieu d'année (T2) qui étaient programmés la première semaine du confinement n'ont donc pu être réalisés. Ils ont été réalisés en juin 2020, mais sur une petite partie des élèves seulement (8 élèves du groupe MAN et 7 élèves du groupe CLA). Les résultats ont montré une absence d'amélioration par rapport aux tests de début d'année (septembre 2019). En conséquence, les résultats de fin d'année de 6^{ème} n'ont pas été pris en compte dans l'étude pour les deux promotions. Pour la promo 2, les tests initialement prévus en T2 pour la 6^{ème}, ont été réalisés en 5^{ème}, un mois après la rentrée de septembre 2020 (soit après 10 cours). Pendant cette période, l'enseignant devait remettre les élèves de 5^{ème} au niveau qu'ils avaient en 6^{ème}, en mars 2020. Cependant, les classes étant réorganisées en 5^{ème}, les élèves issus des deux classes de 6^{ème} qui avaient eu les deux apprentissages différents ont été mélangés. Pour conserver les différences possibles entre les groupes à la suite de l'apprentissage manuscrit ou clavier, l'enseignant

a eu pour consigne de ne pas faire écrire les élèves pendant toute la remise à niveau (pour éviter aux élèves du groupe clavier d'écrire à la main avant les premiers post-tests).

Pour résumer, en 6^{ème}, les élèves ont donc tous eu une session de test en début d'année, avant l'apprentissage différencié et une après six mois d'apprentissage différencié (mais avec une durée différente entre la fin des six mois et la session de test). Pour la promotion 1, l'apprentissage différencié s'est poursuivi pendant trois mois (d'avril à juin), mais nous n'avons pas considéré cette période qui n'a pas existé pour la promo 2. Les élèves de la promo 1 ont atteint en fin d'année un niveau supérieur à celui de la promo 2.

1.3.2. Retour à la méthode traditionnelle d'apprentissage

Pour la promotion 1, les sessions de début et milieu d'année de 5^{ème} (T4 et T5) ont pu être réalisées. Cependant, la session de tests de fin d'année de 5^{ème} (T6) n'a pas été réalisée car seule une petite partie des élèves avaient repris les cours d'arabe en juin 2020.

Pour la promotion 2, comme expliqué précédemment, la session de tests de début d'année de 5^{ème}, décalée d'un mois, correspond aux tests de la session T2. Comme les tests de début d'année de 5^{ème} ont été décalés, ceux de milieu d'année ont également été reportés à la semaine du 5 avril, soit environ un mois plus tard que la première année (semaine du 9 mars en 2020). Cependant, le 3^{ème} confinement à une nouvelle fois arrêté les cours en présentiel (du 5 avril 2021 au 3 mai 2021) et les tests ont été réalisés la semaine du 17 mai, soit deux semaines après le retour en classe. Les tests de fin d'année de la première cohorte (T6) n'ayant pu être réalisés, ceux de la deuxième cohorte n'ont pas été réalisés non plus (ces tests prévus mi-juin auraient de toute façon été trop proches des précédents (T5) qui ont été faits mi-mai).

L'ensemble des élèves a donc été testé après environ six mois d'apprentissage traditionnel. La promotion 1 a été testée immédiatement après les six mois. Pour la promotion 2, les six mois d'apprentissage ont été suivis de l'arrêt des cours pendant un mois et de deux semaines de cours avant d'effectuer les tests.

1.3.3. Sessions de tests analysées

L'ensemble des enfants a donc été testé à 3 moments (T1, T2 et T5) :

- **pré-test** : à l'entrée en 6^{ème} (sept 2018 et sept 2019). Il permet de connaître le niveau initial des élèves en arabe,
- **post-test 1** : (mars 2019 et septembre 2020). Il permet de mesurer l'évolution des élèves après une période équivalente d'apprentissage de 6 mois au clavier ou à la main,
- **post-test 2**, (mars 2020 et mai 2021). Il permet de suivre l'évolution à plus long-terme des élèves, 6 mois après un retour à l'enseignement traditionnel (manuscrit sur papier) pour tous les élèves, quel que soit le mode d'enseignement dont ils ont bénéficié en 6^{ème}.

Le pré-test sera par la suite appelé T0, le post-test1 T1 et le post-test2 T2.

1.4. Tests réalisés

Nous avons effectué deux catégories de mesures :

Mesures permettant de décrire la population de l'étude

Une batterie de mesures initiales destinées à décrire les élèves impliqués dans l'étude a été effectuée lorsque les élèves sont entrés dans l'étude (en début de 6^{ème}). Ces mesures consistaient à définir le niveau en lecture et écriture du français, le rapport qu'entretient chaque élève avec l'écriture du français (usage, fréquence...), avec la langue arabe et avec les outils numériques.

Le niveau initial en lecture du français a été évalué à l'aide du ROC (Repérage Orthographique Collectif ; Allal, 2005). Le ROC est un outil développé par des chercheurs en science de l'éducation, et psychologie, enseignants et médecins, à destination des enseignants et diffusé gratuitement. Il s'agit d'une épreuve écrite, dont la passation se fait en classe entière, permettant d'obtenir un score en orthographe. Le ROC a été testé auprès de 1225 élèves du CM2 à la 6^{ème} en 2004-2005 et a fourni des scores pour repérer les élèves en difficulté, faibles et très faibles en orthographe. Il a été montré que le niveau en

orthographe est fortement corrélé avec le niveau en lecture (Ehri, 1997), ce test permet donc de quantifier le niveau en lecture sans procéder à un test de lecture à voix haute en passation individuelle. Ce test se compose de deux parties. La première est une épreuve de jugement orthographique pendant laquelle l'élève doit repérer et corriger des erreurs introduites dans un texte pendant cinq minutes. La seconde épreuve est une dictée d'un texte court, dont la cotation porte sur la production correcte de 10 orthographe d'usage et 10 orthographe d'accord. La dictée du texte est faite une seule fois et ne doit pas dépasser huit minutes. Un exemple du ROC réalisé par un élève est disponible en annexe 2.

Le niveau initial en écriture du français a été mesuré avec le BHK-Ado (appelé également échelle d'évaluation rapide de l'écriture – Ado ; Soppelsa et Albaret, 2012). Le BHK-Ado a été étalonné sur 471 enfants de collège, de la 6^{ème} à la 3^{ème}. L'épreuve consiste à faire copier un texte aux élèves sur une page blanche pendant cinq minutes, en respectant la casse et les retours à la ligne. Le test comprend deux mesures : la vitesse d'écriture et la qualité de l'écriture. La vitesse d'écriture correspond au nombre de caractères ayant été écrits pendant les cinq minutes. Le score de qualité de l'écriture est défini à partir de neuf items (variation de hauteur des lettres troncs, hauteur relative des lettres troncs et des lettres avec hampe et /ou jambage, télescopage, lettres ambiguës, lettres majuscules à l'intérieur des mots, parallélisme des lignes, stabilité des mots, stabilité des « a » et stabilité des « t »). Chaque item est noté entre 0 et 5 points, selon l'apparition de l'item dans chacune des cinq premières lignes suivant le premier paragraphe. Le texte produit par un élève est disponible en annexe 3.

Nous avons construit un questionnaire à destination des élèves décomposé en 4 parties. La première partie est un auto-questionnaire sur les compétences en arabe, la seconde partie comporte des questions sur la fréquence de l'utilisation de la langue arabe, la troisième sur l'écriture du français et la quatrième sur l'utilisation des outils numériques pour écrire. Un exemple de questionnaire rempli par un élève est disponible en annexe 4.

Ces données et celles de 40 autres élèves de 6^{ème} suivant l'option arabe sont en cours de traitement pour la publication d'un article visant à définir les liens entre l'apprentissage de l'écriture du français et de l'arabe chez les enfants issus de milieu arabophone.

Mesures répétées permettant de définir le niveau en lecture et écriture de l'arabe

Une série de tests mesurant la connaissance effective de la lecture et de l'écriture de l'arabe a été effectuée tout au long de l'apprentissage en 6^{ème} et 5^{ème}. La création de ces tests a été faite sous deux conditions :

- Les tests devaient évaluer une habileté de la littéracie, au niveau de la lettre, du mot ou des caractéristiques du système graphique : le sens d'écriture/lecture (tableau 4).

Au niveau de la lettre, nous avons testé la production d'écriture dans les deux modalités (à la main et au clavier), en copie simple et en copie avec rappel du bon allographe (voir détails plus loin). Nous avons également testé le rappel libre de lettres en écriture manuscrite. La connaissance de la forme visuelle des lettres, la connaissance de la forme visuelle des allographes de ces lettres, et l'association graphophonologique ont également été testées. Ces tests devaient mesurer comment la capacité à écrire les lettres se développe selon le mode d'écriture. Ils devaient également mesurer l'impact du mode d'écriture sur des aspects plus perceptifs : la reconnaissance visuelle des lettres, la connaissance allographique (connaissance des différentes formes que peut prendre une lettre) et la relation graphophonologique. Au niveau du mot, nous avons testé la lecture et l'écriture, en copie et en dictée. Enfin nous avons testé l'acquisition du sens d'écriture et de lecture de l'arabe.

- Les tests devaient être adaptés au niveau des élèves et réalisables en classe entière. Ils devaient permettre de différencier les élèves et être à la fois assez difficiles pour ne pas donner lieu à un effet plafond et, au contraire pas trop difficiles afin de ne pas mettre d'élèves en situation d'échec systématique et ne pas donner lieu à des élèves inactifs pendant la session de test. La difficulté des tests a donc augmenté au fur et à mesure des sessions de tests. Les mêmes tests ont été réalisés par les deux groupes.

Les tests de début et milieu d'année ont été prétestés en juin 2018 sur la classe pilote. Les tests de fin d'année de 6^{ème} et de 5^{ème} ont été complexifiés en fonction d'observations du niveau des élèves de la première cohorte pendant les séances de cours et des séances de réflexion avec l'enseignant. Les tests ont été conçus pour les six sessions de tests présentées précédemment. Cependant, nous rapportons ici seulement les tests qui ont pu être analysés.

A T0, trois tests ont été réalisés. A T1, à ces trois tests, cinq autres tests se sont ajoutés. A T2, sept des tests de T1 ont été présentés ainsi qu'un nouveau test. Le nom des tests présentés à chaque session, l'évolution dans leur difficulté et les compétences testées sont disponibles dans le tableau 4.

Connaissance évaluée	Nom du test	T0	T1	T2
Rappel des lettres, production du sens d'écriture	nb-lettre	x	x	x
Graphomotricité (x1, x2), production manuscrite d'allographe (x2)	copie-man	x1	x2	x2
Ecriture au clavier, production au clavier d'allographes	copie-cla		x	
Reconnaissance visuelle allographique	allo-lettre	x1	x2	x3
Reconnaissance visuelle des lettres	miroir-lettre		x1	x2
Relation grapho-phonémique	phono-lettre		x	x
Lecture de mots	lecture-mot		x1	x2
Dictée de mots	dictée-mot			x
Sens de lecture	sens-lecture		x	x

Tableau 4 : Tests réalisés en fonction des sessions. La présence d'une croix indique que le test a été réalisé. Les numéros à côté des croix indiquent que la difficulté du test est augmentée d'une session à l'autre.

La partie suivante présente le protocole, le matériel et les variables analysées dans chaque test.

1.4.1. Rappel libre des lettres : « nb-lettre »

Nb-lettre permettait de mesurer trois aspects de la littératie : le nombre de lettres arabes correctes connues, c'est-à-dire celles qui avaient une représentation visuelle, la qualité de cette forme visuelle (avec le nombre de lettres produites en miroir) et

l'acquisition du sens d'écriture arabe. L'élève devait écrire sur une feuille toutes les lettres arabes qu'il connaissait. Ce test se faisait en premier pour éviter que l'élève utilise des caractères vus dans un autre test et il se faisait de façon manuscrite pour tous les élèves.

Les variables dépendantes de nb-lettres étaient :

- le nombre de lettres correctement écrites, qui pouvait aller de 0 à 28.
- le nombre de lettres écrites en miroir,
- le nombre d'élèves produisant des lettres en miroir.
- quand cela était possible, la direction dans laquelle les lettres étaient écrites les unes par rapport aux autres : de droite à gauche (sens correct, codé 1) ou de gauche à droite (sens incorrect, codé 0 ; figure 27).

Ce test a été répété à l'identique pendant les 3 sessions de tests (T0, T1, T2).

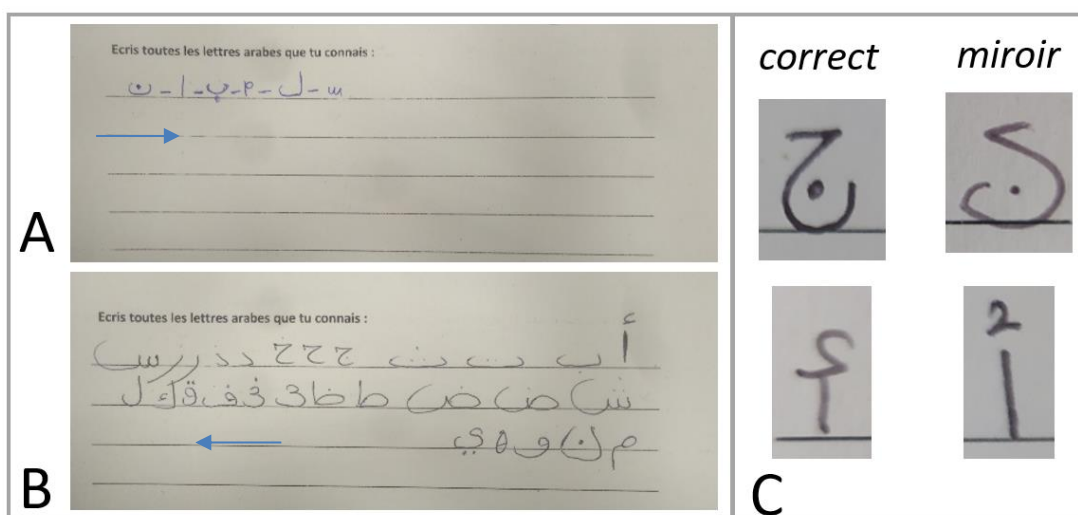


Figure 27 : A et B : exemples de réponses. Les flèches représentent le sens d'écriture. C : exemples de lettres correctes (à droite) et en miroir (à gauche).

1.4.2. Copie manuscrite de mots : « copie-man »

Copie-man permettait de mesurer deux aspects : la vitesse d'écriture manuscrite et la correspondance allographique.

A. T0

Pour pouvoir être faite, même par des élèves ne connaissant pas le système graphique arabe, copie-man est une tâche de copie manuscrite de mots isolés. Ce test était fait sur tablette numérique Samsung Galaxy Tab A P550 avec S pen 9.7" grâce à une application développée au laboratoire (par J.C. Gilhodes et J. Statopoulos). L'élève devait recopier dix mots issus du manuel, comprenant entre 3 et 5 lettres. Le modèle apparaissait en haut de l'écran de la tablette et restait affiché jusqu'à que l'élève appuie sur « suivant », pour passer à essai suivant. Les deux premiers mots servaient d'entraînement. Les mots utilisés dans copie-man à T0 sont disponibles en annexe 5.

Les essais comprenant des erreurs (oubli d'une lettre, oubli d'une partie de lettre, lettres illisibles, problèmes techniques) ont été enlevés de l'analyse (10%). La durée totale d'écriture de chaque mot a été calculée. Les mots étant de différentes longueurs, la durée totale d'écriture a été divisée par le nombre de lettres des mots afin d'obtenir une durée moyenne par lettre. Pour l'analyse statistique de la durée moyenne par lettre, les essais supérieurs de plus de 2.5 écarts-types de la moyenne de chaque groupe ont été enlevés (12 essais pour le groupe MAN et 14 pour le groupe CLA).

B. T1 et T2

La tâche était similaire à celle de T0 pour la moitié des essais (cinq essais « faciles »). Pour les cinq autres essais, dits « difficiles », les mots étaient présentés en lettres isolées et l'élève devait écrire le mot dans sa forme attachée (figure 28). Les mots en lettres isolées et attachées sont présentés dans un même bloc de façon aléatoire (mais le même ordre a été conservé pour tous les élèves). Avant de commencer le test, il y avait deux essais d'entraînement (un présenté en lettres attachées et un en lettres isolées).

Les mots étaient composés de 3 à 5 lettres et étaient issus du manuel. Dans les 2 conditions (« facile » et « difficile »), les mots étaient appariés sur le nombre de levers et le nombre de « grandes lettres ». En condition « difficile », les lettres étaient séparées par un signe « + » pour que l'élève pense à les attacher. Les mots utilisés dans la tâche copie-man en T1 et T2 sont disponibles en annexe 5.

Les cinq mots copiés en condition « facile » ont été utilisés pour obtenir la durée moyenne d'écriture des lettres comme à T0. Pour chaque essai, la présence d'une erreur (39% des essais en moyenne) a été utilisée comme variable binaire (1 pour correct et 0

pour erreur) et analysée en fonction du groupe et de la condition (« facile » ou « difficile »).

« Copie-man » permettait de mesurer l'évolution de la durée moyenne d'écriture par lettre et la correspondance allographique.

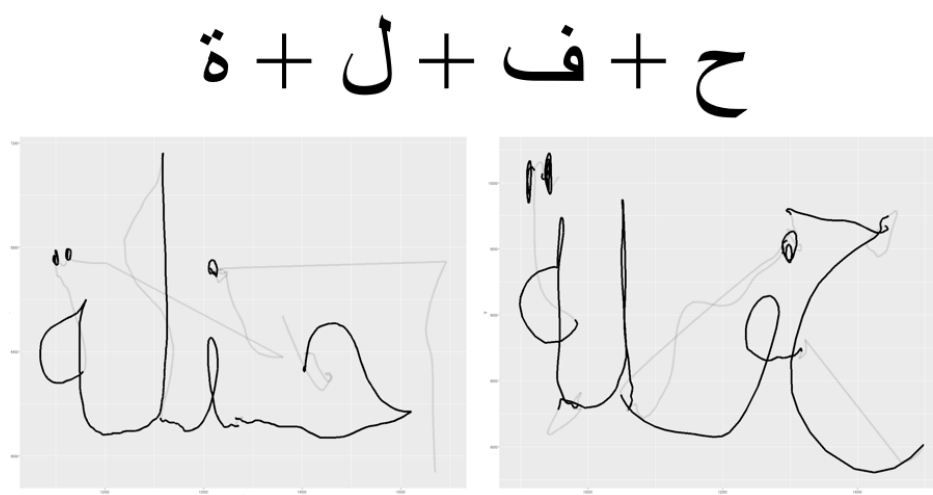


Figure 28 : Exemple d'un modèle en lettres isolées et d'une production écrite juste (à gauche) et fausse (à droite). Les traits noirs correspondent aux mouvements où le stylet est en contact avec la tablette et les traits gris représentent les mouvements du stylet en l'air.

1.4.3. Copie de mots au clavier : « copie-cla »

« Copie-cla » permettait de mesurer la compétence en frappe au clavier et la correspondance allographique. Il a été réalisé après la période d'apprentissage différencié (en T1). Copie-cla a été réalisé sur la tablette numérique (Samsung Galaxy Tab A P550 avec S pen 9.7") et avec l'application LimeSurvey permettant de présenter visuellement les mots et de répondre à l'aide du clavier arabe. Ce test a été construit de façon similaire à copie-man à T1 et T2. Les élèves devaient recopier 10 mots avec le clavier. Les mots étaient présentés un par un et restaient affichés à l'écran jusqu'à ce que l'élève appuie sur une flèche pour passer à l'essai suivant. Cinq mots étaient présentés en lettres isolées (condition « facile ») et cinq mots étaient présentés en lettres attachées (condition

« difficile »). Avant de commencer le test, il y avait deux essais d'entraînement (un en lettres isolées et un en lettres attachées).

Les mots étaient composés de 3 à 5 lettres et étaient issus du manuel, ils étaient différents de ceux de la tâche copie-man. Les mots à écrire dans les 2 conditions (« facile » et « difficile ») contenaient le même nombre de lettres dont la forme était différente dans le modèle (mot attaché) et sur le clavier (forme isolée). En condition « facile », les lettres étaient séparées par un signe « + ». Les mots utilisés dans la tâche copie-cla en T1 sont disponibles en annexe 5.

Pour chaque essai, la présence d'une erreur (19% des essais en moyenne) a été utilisée comme variable binaire (1 pour correct et 0 pour erreur) et analysée en fonction du groupe et de la condition (« facile » ou « difficile »).

1.4.4. Reconnaissance visuelle des allographes : « allo-lettre »

Allo-lettre permet de tester la reconnaissance visuelle des allographes. Ce test a été réalisé sur la tablette numérique avec l'application OpenSesame runtime pour Android (Mathôt et coll., 2012). Chaque essai commençait par la présentation d'une croix de fixation pendant 500ms. Ensuite, une lettre arabe isolée était présentée pendant 1000ms puis disparaissait et était remplacée par un cache (###) pendant 500 ms, lui-même suivi d'un mot arabe. L'élève devait dire si la lettre qu'il venait de voir sous sa forme isolée était présente dans le mot qui suivait. Pour cela, il appuyait sur un rond vert « OUI » ou un rond rouge « NON » (figure 29). Lorsqu'il répondait, le programme passait à l'essai suivant. L'élève avait également la possibilité de répondre « je ne sais pas ». Si l'élève ne répondait pas, le programme passait automatiquement à l'essai suivant après 8s. La position (gauche ou droite) des réponses OUI et NON était contrebalancée entre les élèves. L'ordre de présentation des essais était aléatoire. Le test commençait par un entraînement de 5 essais.

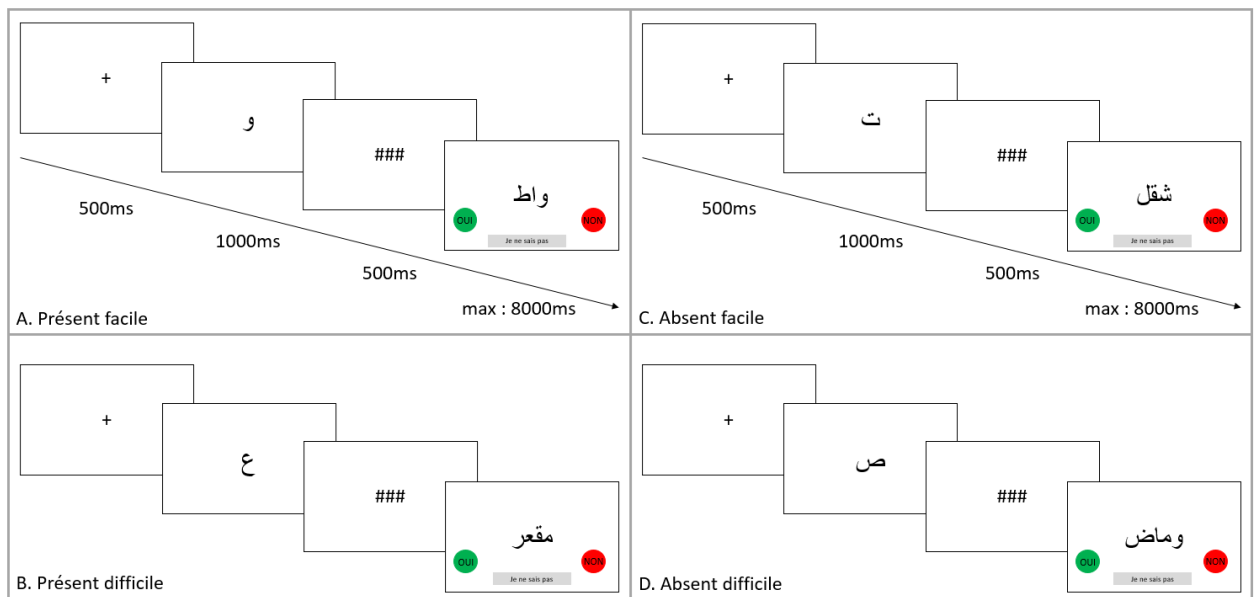


Figure 29 : représentation schématique de 4 exemples du test 'allo-lettre'.

Evolution du test : Ce test est répété à chaque session de test (T0, T1, T2) mais la difficulté du test est augmentée à chaque session. En T0, la moitié des essais sont des essais « faciles » où la lettre amorce et la lettre cible ont la même forme, ou une forme très proche, et sa reconnaissance peut se faire à partir d'une comparaison visuelle, même si l'élève ne connaît pas le système graphique arabe (figure 29). L'autre moitié des essais est « difficile » car la lettre cible a une forme différente de la lettre amorce. La reconnaissance de la lettre ne peut se faire que si l'on connaît ses différents allographes. En T1, les élèves ayant travaillé les lettres sous leurs différentes formes, le nombre des essais « faciles » a été réduit et davantage d'essais « difficiles » ont été ajoutés. Enfin, à T2, pour complexifier la tâche, l'ordre d'apparition de la lettre et du mot a été inversé : le mot était d'abord présenté, puis la lettre, et l'élève devait décider si elle faisait partie du mot vu précédemment.

A. Matériel à T0 :

30 mots rares (mots spécifiques d'un domaine issus de Kalimât : Le vocabulaire arabe ; Guidère, 2005) ont été utilisés, pour qu'ils soient inconnus de tous les élèves. Parmi les essais, il y avait :

- 15 essais « faciles » : la forme de la lettre isolée était la même ou était très proche de celle

de cette lettre dans le mot,

- 15 essais « difficiles » : la forme de la lettre isolée était visuellement différente de celle dans le mot et seuls les élèves connaissant les différentes formes de la lettre et les caractéristiques de la langue arabe pouvaient reconnaître leur présence ou absence (figure 29).

Les essais faciles avaient pour but de rendre la tâche accessible pour un débutant complet. Les lettres étaient effectivement présentes dans 2/3 des essais. Les lettres et mots utilisés dans allo-lettre à T0 sont disponibles en annexe 6.

B. Matériel à T1 et T2 :

40 mots ont été utilisés, 20 mots rares et non travaillés en cours (issus de Kalimât : Le vocabulaire arabe ; Guidère, 2005) qui ont été présentés à T0 et 20 mots travaillés en cours (issus du manuel). Parmi ces 40 mots, la lettre était effectivement présente dans 20 essais qui étaient tous « difficiles » (la forme de la lettre changeait entre la lettre isolée et le mot). La lettre était absente pour les 20 autres essais, il y avait 10 essais « faciles » et 10 essais « difficiles ». Les lettres et mots utilisés dans 'allo-lettre' à T1 et T2 sont disponibles en annexe 6.

La variable dépendante d'allo-lettre était la justesse de chaque réponse (1 pour correcte et 0 pour incorrecte). Etant donné que la complexité du test a été augmentée entre les trois moments, nous avons effectué une analyse de l'évolution des élèves par comparaison deux à deux des tests les plus proches dans le temps. L'analyse au moment T0 et T1 a été réalisée sur les 15 essais difficiles communs aux deux moments, ces essais étant ceux permettant de mesurer la connaissance des allographes. Entre T1 et T2, l'analyse a été réalisée sur l'ensemble des essais, communs aux deux tâches.

1.4.5. Reconnaissance visuelle des lettres : « miroir-lettre »

Ce test permet d'évaluer la connaissance de la forme visuelle de la lettre et la confusion avec sa forme en miroir. Miroir-lettre a été passé par les élèves à T1 et T2. Ce test a été réalisé sur la tablette numérique avec l'application OpenSesame runtime pour Android (Mathôt, 2012). Pour chaque essai, une lettre arabe isolée était présentée très rapidement (100ms), puis les élèves devaient dire si la lettre qu'ils venaient de voir était une lettre arabe ou pas (en appuyant sur un bouton « OUI » et un bouton « NON »). Un cache (### pendant 500 ms) suivait la présentation de la lettre et une croix de fixation (500ms) séparait chaque essai. Si l'élève ne répondait pas dans les huit secondes, le programme passait à l'essai suivant. Le test commençait par un entraînement de 4 essais. La position (gauche ou droite) des réponses OUI et NON était contrebalancée entre les élèves.

A T1, le test se composait de 60 essais dont :

- 30 lettres arabes (20 isolées ; 10 liées) ; réponse « OUI »
- 15 lettres hébraïques ; réponse « NON »
- 15 lettres arabes en miroir (10 isolées ; 5 liées) ; réponse « NON » (tableau 5).

L'ordre de présentation était pseudo-aléatoire :

- une lettre en miroir n'apparaissait jamais avant, ou après, sa forme correcte
- une lettre attachée n'apparaissait jamais avant, ou après, sa forme isolée
- une lettre en miroir n'était jamais suivie d'une autre lettre en miroir
- les lettres en miroir étaient présentées avant leur forme correcte dans la moitié des cas
- les lettres en miroir présentées avant leur forme correcte étaient contrebalancées entre les élèves.

A T2, ce test a été complexifié : il n'y avait plus que cinq lettres hébraïques et les dix autres lettres hébraïques ont été remplacées par dix fausses lettres arabes, ayant un mauvais nombre ou une mauvaise position des points (tableau 5). Le matériel utilisé dans 'miroir-lettres' est disponible en annexe 7.

	Isolé	Lié
Correct	ص ج	ص ج
Miroir	ص ج	ص ج
Point	ص ج	
Hébraïque	ג ת	

Tableau 5 : exemple de lettres et pseudo-lettres utilisées.

Les essais d'intérêt étaient les essais présentant des lettres en miroir et ceux présentant des lettres avec un mauvais nombre de point ou une mauvaise position. Les lettres hébraïques étaient des essais « faciles » destinés à rendre la tâche réalisable par les élèves ne connaissant pas l'orientation des lettres. Les essais présentant des lettres avec un mauvais nombre de points ou une mauvaise position n'étant présents qu'à T2, l'évolution de la réussite à ces essais n'a pas été analysée. L'analyse a donc porté sur la justesse des 15 essais en miroir (codé 0 ou 1).

1.4.6. Relation graphophonologique : « phono-lettre »

Phono-lettre mesure la connaissance de la relation graphophonologique des élèves. Dans ce test, l'élève devait « transcrire phonologiquement » des lettres, c'est-à-dire écrire la lettre française correspondant au son, ou au nom, de la lettre arabe. Il y avait 12 lettres arabes qui correspondent à des phonèmes de la langue française (tableau 6). Les lettres étaient rangées par ordre d'apprentissage (selon les unités du manuel). Le test se faisait sur papier et les élèves avaient un maximum 5 minutes pour le réaliser. La variable dépendante de phono-lettre était le nombre de lettres correctement transcrites, allant de 0 à 12.

Lettre	Nom	Son en français	Unité du manuel
ب	Ba	B	1
ي	Ya	I	1
ل	Lam	L	1
م	Mim	M	1
ن	Noun	N	1
س	Sin	S	1
د	Dal	D	2
ف	Fa	F	2
ج	Jim	J	2
ك	Kaf	K	2
ت	Ta	T	2
ش	Chin	CH	3

Tableau 6 : Lettres utilisées dans phono-lettre.

1.4.7. Lecture et traduction de mot : « lecture-mot »

Les tests ne se faisant pas en passation individuelle, nous n'avons pu faire de tâche de lecture orale. Nous avons donc mis au point un test de lecture pouvant être réalisé à l'écrit. Dans un premier temps, une liste de 12 mots arabes était présentée à l'élève sur une feuille et il devait écrire en face de chaque mot sa traduction française. Les 12 mots avaient été vus en cours et étaient organisés par ordre de difficulté (selon les unités du manuel). Les 12 mots étaient également présentés dans d'autres tests (allo-lettre, copie-man et copie-cla). Le nombre de mots correctement traduits, correspond à un score de lecture. Cependant l'absence de réponse pour un mot ne résulte pas nécessairement d'une difficulté de lecture mais peut également être le résultat d'une difficulté à traduire le mot, due à un manque de vocabulaire arabe. Dans un second temps, les élèves devaient traduire les mêmes mots mais qui étaient cette fois-ci dictés à voix haute par l'enseignant

ou un expérimentateur arabophone (figure 30). Le nombre de mots correctement traduits dans cette présentation orale mesurait alors le niveau de vocabulaire arabe de l'élève. En effet, si l'élève réussissait à traduire le mot entendu oralement alors qu'il ne l'avait pas fait précédemment, quand il était présenté visuellement, c'est qu'il connaissait ce mot mais était incapable de le lire. Le score de lecture a donc été corrigé en le divisant par le score de vocabulaire. A T2, quatre mots ont été ajoutés. Les mots utilisés pour lecture-mot sont disponible en annexe 8.

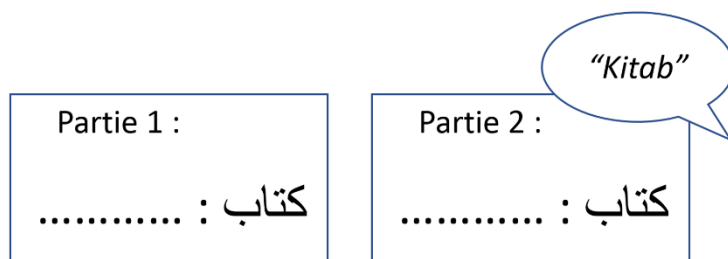


Figure 30 : Illustration de dictée-mot.

La variable dépendante devait être le pourcentage de mots correctement traduits par les élèves. Cependant, au vu des faibles résultats obtenus par les élèves dans ce test, l'analyse a été faite sur le nombre d'élèves ayant réussi à lire au moins un mot (chaque élève était alors codé 1 ou 0).

1.4.8. Dictée de mots : « dictée-mot »

Ce test évalue la maîtrise de la relation phono-graphémique. Il a été réalisé uniquement à T2. Pour ce test, 6 mots ont été lus, un par un, par l'enseignant ou par un expérimentateur arabophone (tableau 7). Les élèves devaient écrire à la main les mots sur une feuille. Il y avait trois mots issus du manuel et trois mots issus de Kalimât : Le vocabulaire arabe (Guidère, 2005). L'analyse statistique a été réalisée sur le nombre de mots correctement écrits.

Mot à copier	Traduction
واحد	un
اثنان	deux
ستة	six
مبلط	carreleur
وكيل	mandataire
ملحق	annexe

Tableau 7 : Liste des mots utilisés dans dictée-mot.

L'analyse devait être réalisée sur le nombre de mots écrits avec la bonne orthographe ou avec une orthographe phonologiquement possible, allant de 0 à 6. Cependant au vu des faibles résultats obtenus par les élèves dans ce test, l'analyse a été faite sur le nombre d'élèves en ayant écrit au moins un (chaque élève était codé 1 ou 0).

1.4.9. Sens de lecture : « sens-lecture »

Ce test mesure l'acquisition du sens de lecture arabe (de droite à gauche). Il a été réalisé sur la tablette numérique avec l'application OpenSesame. L'élève voyait une lettre cible arabe pendant 1000 ms puis une phrase en arabe et il devait toucher le plus rapidement possible avec son index toutes les occurrences de la lettre cible. Lorsque l'élève appuyait sur l'écran de la tablette, une croix apparaissait à cet endroit. Les phrases étaient composées de 7 à 8 mots et contenaient sept fois la lettre cible. Les lettres cibles étaient réparties de façon régulière dans la phrase. Il y avait deux phrases où les lettres cibles ne changeaient pas de forme et une troisième phrase où la lettre à trouver changeait de forme sauf dans un cas, tout à gauche (tableau 8), ce qui pouvait attirer l'attention de l'élève et favoriser une lecture dans le mauvais sens (gauche-droite). La première phrase servait d'exemple.

La localisation (en x et y) de chaque appui sur la tablette a été enregistrée en fonction du temps. Cette localisation a été comparée à celle des lettres pour vérifier que l'élève avait bien appuyé sur une lettre et pour connaître la position dans la phrase de la lettre

cochée. L'ordre dans lequel les lettres ont été cochées a été noté comme 'correct' quand il allait de la droite vers la gauche (avec un retour en arrière permis) ou 'sens inverse' quand il allait de la gauche vers la droite (avec un retour permis) ou 'absence de sens' (lettres cochées sans présenter de direction précise). Pour l'analyse statistique, les essais dans le sens corrects ont été codés avec la valeur 1 et les essais en sens inverse et sans sens apparent ont été codés 0.

Lettre cible	Phrase
و	يروى الولد بالدلو كل يوم ورد الحوض
ر	يركل رامي الكرة الحمراء برجله نحو المرمى
ي	يحضر سمير هدية جميلة اليوم لصديقه راوي

Tableau 8 : Matériel utilisé dans la tâche sens de lecture

1.5. Analyses statistiques

1.5.1. Analyse de T0 : description des groupes

Afin de s'assurer de l'équivalence des groupes MAN et CLA au début de l'étude, les niveaux initiaux en littératie du français et de l'arabe ont été comparés entre les deux groupes à T0. Pour le niveau en littératie du français, le score en orthographe du ROC et les deux scores du BHK (fréquence d'inscription et qualité de l'écriture) ont été modélisés à l'aide d'un modèle linéaire.

Pour le niveau initial en littératie de l'arabe, le nombre de lettres produites, issu de nb-lettre, a été modélisé à l'aide d'une régression linéaire. Les réponses correctes des 15 essais difficiles d'allo-lettre (c'est-à-dire ceux pour lesquels la reconnaissance de l'allographe ne pouvait se faire sur une simple similitude visuelle mais qui nécessitaient de savoir que les deux allographes appartenaient à la même lettre) ont été modalisées

avec une régression logarithmique binomiale. Pour ces analyses, l'effet du groupe d'apprentissage a été entré en facteur à deux modalités (MAN et CLA). Nous avons également comparé le nombre d'élèves ayant eu, ou non, des cours d'arabe avant l'entrée en 6^{ème} (au primaire ou en activité extra-scolaire, les deux ou aucun cours) en réalisant un test χ^2 de Pearson.

1.5.2. Analyse de T0, T1 et T2 : évolution de l'apprentissage

Différents modèles mixtes ont été réalisés en fonction de la nature, de la répétition et de la hiérarchie dans les données. Les modèles mixtes apportent deux avantages principaux : ils permettent de modéliser des données suivant une distribution particulière (binomiale, poisson...) et de prendre en compte la hiérarchie des données, soit une non-indépendance des observations (Baayen et coll., 2008). Dans notre étude, il existait trois sources d'emboîtement dans les données (figure 31). La première, la classe, est récurrente dans les études en milieu scolaire (Theobald, 2018) : chaque enfant qui fournit un point de mesure n'est pas complètement indépendant des autres : il appartient à une classe et cela peut expliquer une certaine part de la variabilité entre les élèves, surtout sur l'évolution d'un apprentissage ayant lieu dans la classe. La deuxième source de variabilité est la répétition de la mesure chez un même élève, à plusieurs sessions de tests ou avec plusieurs essais à un même test. Enfin la troisième source de variabilité est due aux différents essais qui, étant réalisés par tous les élèves, donnent lieu également à une non-indépendance des données. Les effets aléatoires ajoutés dans le modèle permettent au modèle d'estimer cette variance additionnelle due à ces effets.

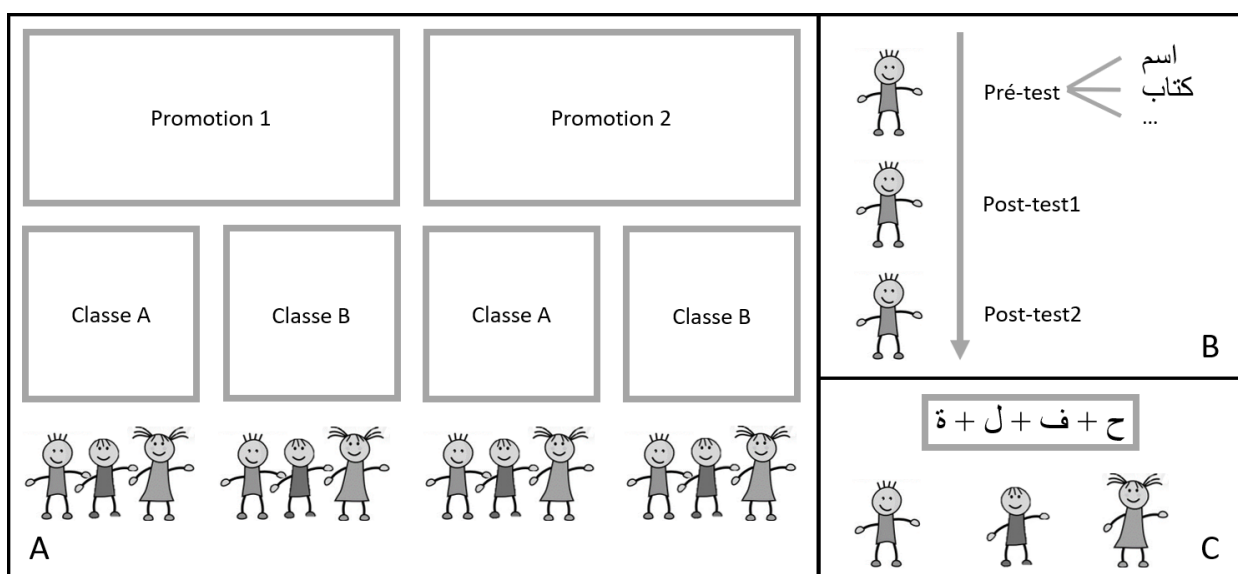


Figure 31 : Organisation des données. A. Emboîtement des élèves par classe et par promotion. B. Mesure répétée chez un élève aux trois moments de test et mesure comprenant plusieurs essais. C. Mesure répétée d'un item réalisé par tous les élèves.

Les VDs correspondant au nombre de lettres produites en rappel libre, transcrites phonologiquement, et à la durée d'écriture manuscrite ont été analysées à l'aide d'un modèle mixte linéaire. Les VDs correspondant à des réponses binaires vrai/faux (copie-man, copie-cla, allo-lettre et miroir-lettre) ou à la présence/absence chez un élève d'un comportement (lettres produites en miroir, sens d'écriture et de lecture et dictée-mot & lecture) ont été modélisées à l'aide d'un modèle mixte généralisé suivant une régression logarithmique binomiale.

1.5.2.1. Effets fixes

Pour l'ensemble des modèles, la VI d'intérêt, le groupe d'apprentissage, a été entrée en effet fixe (recodé -0.5 pour le groupe MAN +0.5 pour le groupe CLA). Le moment d'acquisition a également été entré dans le modèle comme facteur fixe. Lorsque la VD avait deux points de mesure (T0 et T1 ou T1 et T2), le moment a été recodé (-0.5 pour le premier et +0.5 pour le deuxième). Lorsque la VD avait trois points de mesures (T0, T1 et T2), le moment n'a pas été recodé, pour éviter une linéarité des effets T0/T1 et T1/T2. Le moment de référence était T1, permettant ainsi la comparaison T1/T0 et T1/T2. Seule

l'analyse du test 'copie-clavier' ne comprend pas le moment car elle n'a été réalisée qu'en T1. Pour les tests de 'copie-manuscrit' et 'copie-clavier', la condition de présentation du modèle en (lettres isolées ou liées) a également été entrée en effet fixe dans le modèle. Les conditions de présentation du modèle ont été recodées : -0.5 pour la plus simple (soit isolée pour la tâche copie-clavier et liée pour la tâche copie-manuscrit) et +0.5 pour la condition la plus compliquée (soit liée pour le clavier et isolée pour la tâche copie-manuscrit). De la même façon pour le test sens-lecture, la variable 'phrase facile' et 'phrase difficile' a été ajoutée en effet fixe (codée -0.5 pour la phrase facile et +0.5 pour la phrase difficile).

Pour prendre en compte l'impact de l'arrêt des cours qui a perturbé l'apprentissage pour la deuxième cohorte, la variable 'promotion' (promo1 2018/2019 vs promo2 2019/2020) a été prise en compte. Pour chaque VD nous avons testé si l'ajout de cette variable en effet principal ou en interaction avec le moment améliorerait le modèle statistique. En effet, nous pouvons raisonnablement supposer que la promotion impactera d'avantage le post-test1 et le post-test2, et n'affectera pas le pré-test. L'AIC (Akaike Information Criterion) a été utilisé pour comparer les modèles et l'effet principal de la promotion a été utilisé pour simplifier les modèles statistiques lorsque l'interaction n'expliquait pas mieux les données.

Enfin, les élèves présentaient une forte hétérogénéité dans le niveau initial d'arabe. Afin de prendre cette hétérogénéité en compte pour les VD n'ayant pas été mesurées en pré-test, nous avons ajouté en co-variable le nombre de lettres connues en début de 6^{ème}, comme indice du niveau initial.

1.5.2.2. Effets aléatoires

La variable 'élève' a été entrée en facteur aléatoire pour contrôler la non-indépendance des données avec un intercept aléatoire. Le facteur 'classe' n'a pu être ajouté en facteur aléatoire car il n'y a que 4 modalités pour ce facteur (2018_MAN, 2018_CLA, 2019_MAN et 2019_CLA), ce qui est légèrement trop faible pour être un bon facteur aléatoire (minimum de 5-6 ; Gelman et Hill, 2007). En effet, nous avons testé l'inclusion de la classe en facteur aléatoire et cela n'améliorait l'AIC d'aucun des modèles). Enfin, pour les VDs

comprenant plusieurs essais par élève (copie-man, copie-cla, miroir-lettre, allo-lettre), le facteur aléatoire ‘essai’ a été ajouté dans les modèles. Les modèles finaux utilisés dans l’analyse sont présentés dans le tableau 9.

TEST	VD	modèle
NB-lettre	nb de lettres	<code>lmer(VD ~ groupe2 * moment + annee2 : moment + (1 sujet))</code>
NB-lettre	nb d'élèves miroir	<code>glmer(VD ~ groupe2 + annee2 + (1 sujet))</code>
NB-lettre	nb d'élèves D-G	<code>glmer(VD ~ groupe2 * moment2 + annee2 + (1 sujet), family=binomial)</code>
Copie-man	durée écriture/lettre	<code>lmer(VD ~ groupe2 * moment2 + Annee2 : moment2 + (1 sujet) + (1 mot))</code>
Copie-man	réponse (Juste/Faux)	<code>glmer(VD ~ groupe2 * condition2 * moment2 + annee2 + nb_sept + (1 sujet) + (1 essai), family=binomial)</code>
Copie-cla	réponse (Juste/Faux)	<code>glmer(VD ~ groupe2 * condition2 + annee2 + nb_sept + (1 sujet) + (1 essai), family=binomial)</code>
Lettre-phono	nb de lettres	<code>lmer(VD ~ moment2 * groupe2 + annee2 + nb_sept + (1 sujet))</code>
Allo-lettre (T0/T1)	réponse (Juste/Faux)	<code>glmer(VD ~ groupe2 * moment2 + annee2 + (1 sujet) + (1 essai), family=binomial)</code>
Allo-lettre (T1/T2)	réponse (Juste/Faux)	<code>glmer(VD ~ groupe2 * moment2 + annee2 : moment2 + nb_sept_allo + (1 sujet) + (1 essai), family=binomial)</code>
Miroir-lettre	réponse (Juste/Faux)	<code>glmer(VD ~ groupe2 * moment2 + annee2 + nb_sept + (1 sujet) + (1 essai), family=binomial)</code>
Lecture	nb d'élèves pourcentage lecture>0	<code>glmer(VD ~ groupe2 * moment2 * phrase2 + annee2 + nb_sept + (1 sujet), family=binomial)</code>
Phrase	nb d'élèves D-G	<code>glmer(VD ~ groupe2 * moment2 * phrase2 + annee2 + nb_sept + (1 sujet), family=binomial)</code>
Dictée	nb de lettres	<code>glmer.nb(VD ~ groupe2 + annee2 + nb_sept + (1 sujet))</code>

Tableau 9 : Modèles statistiques utilisés. Le chiffre 2 à la fin du nom d’une variable signifie qu’elle a été recodée. Les facteurs (1|sujet) et (1|essai) représente les intercept aléatoire élèves et essais.

Les modèles ont été réalisés sous R (R version 4.1.0, R Development Core Team, 2015) avec les packages lme4 (Bates, 2015), lmerTest (Kuznetsova, 2017) et emmeans (Lenth, 2021).

Enfin, pour les tests allo-lettre et miroir-lettre nous avons testé si le pourcentage de bonnes réponses était significativement supérieur à 50% à l’aide d’un test statistique t

comparant le ratio du nombre de bonnes réponses sur le nombre total de réponses obtenu par chacun des sujets à la valeur standard de 0.5. Cette analyse a été réalisée à l'aide du logiciel Statistica (version 12).

2. Résultats

Pour chaque test, nous avons rapporté l'effet principal et l'interaction de chaque variable indépendante par la valeur β estimée par le modèle (en unité de la VD pour les modèles linéaires et en 'odd ratio' (côte) pour les modèles en régression logistique) et son erreur standard ('SE'), la valeur du test statistique et celle de la p-value. Les tests post-hoc ont été corrigés pour les comparaisons multiples selon la méthode de Tukey ont été rapportés de la même façon. Pour les VD ayant été mesurée aux trois moments, nous avons utilisé la table de l'ANOVA du modèle pour obtenir une mesure globale de l'effet du moment et une de ces interactions, appelé X^2 . Enfin, pour les tests allo-lettre et miroir-lettre nous avons testé si le pourcentage de bonnes réponses était significativement supérieur à 50% à l'aide d'un test statistique t comparant le ratio du nombre de bonnes réponses sur le nombre de réponses totale obtenu par chacun des sujets à la valeur standard de 0.5.

Pour chaque variable, la représentation sous forme de 'boxplot' est disponible en annexe 9. Lorsqu'il y avait une interaction, les valeurs estimées du modèle et leurs intervalles de confiance à 95% sont également disponibles en annexe 9.

Dans les résultats présentés par la suite, nous allons utiliser les sigles suivants :
Pour les deux groupes différant par le mode d'apprentissage :

- **MAN** : groupe qui a débuté l'apprentissage en écrivant avec le stylet
- **CLA** groupe qui a débuté l'apprentissage en écrivant avec le clavier

Pour les 3 moments de passation des tests :

- **T0** pré-tests (entrée en 6^{ème})
- **T1** post-test 1 (après 6 mois d'apprentissage différencié, manuscrit ou clavier)
- **T2** post-test 2 (après 6 mois d'apprentissage traditionnel)

2.1. Niveau initial des élèves à T0

Niveau en français

Avant de présenter les résultats des élèves qui ont participé à cette étude concernant l'apprentissage de l'arabe, nous présentons leur niveau en français au moment où cette étude a débuté. Cette description de leur niveau dans la maîtrise de l'écrit en français permet de situer le 'contexte scolaire' dans lequel les élèves commencent l'étude la langue arabe à l'écrit. Deux tests destinés à évaluer le niveau initial en français ont été proposés aux élèves : le ROC et le BHK.

Le ROC permet de calculer un score représentatif du niveau de l'élève en orthographe du français en situation de lecture. Alors que, selon le manuel du ROC, le score moyen en 6^{ème} devrait être de 18.4, le score moyen obtenu par notre échantillon d'élèves est de 14.32 (sd=5.53, min=4.00 ; max=27.33) et sur les 72 élèves, 15 sont considérés comme faibles (20.8%) et 33 comme très faibles en orthographe (45.8%).

Le BHK est un test d'écriture qui permet d'attribuer, de façon objective, un score de qualité d'écriture en termes de lisibilité. Plus le score est élevé et moins l'écriture est lisible, le score maximum théorique étant de 65. Les 72 élèves de notre étude ont eu un score moyen de qualité de 9.19 (sd=4.49, min=2, max=23), ce qui est très proche (+ 0.83) de la valeur moyenne de l'étalonnage pour des élèves de 6^{ème}. Seuls 4 élèves se situent au-dessus de 2 écart-types par rapport à cette moyenne.

Le BHK permet également de mesurer la fréquence d'inscription lors d'une tâche de copie d'un texte en français. La fréquence d'inscription est le nombre de caractères écrits pendant les 5 minutes de durée de la copie. Il s'agit donc d'une mesure indirecte de la vitesse d'écriture. Les élèves ont écrit en moyenne 241.8 caractères en 5 minutes (sd=58.7, min=118, max=367). Selon le manuel, en 6^{ème} les enfants devraient écrire en moyenne 330 caractères en 5 minutes. Seuls 8 des élèves parviennent à cette fréquence d'inscription. Le score moyen obtenu par l'échantillon est -1.64 écart-type en dessous de la moyenne attendue et 25 élèves se situent en dessous de 2 écart-types.

Les résultats aux deux tests sont représentés sur la figure 32.

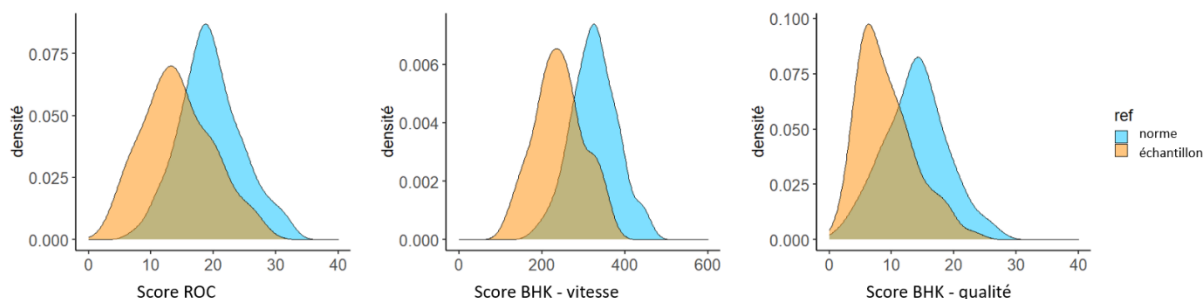


Figure 32 : Niveau initial en français sur l'ensemble du groupe expérimental (orange) par rapport aux normes des manuels (bleu). Pour le score de qualité du BHK, un score plus élevés témoigne d'une écriture de moins bonne qualité.

Résumé du niveau en français :

La connaissance de l'orthographe du français n'était pas suffisamment maîtrisée chez la majorité des élèves. La vitesse d'écriture était également en dessous de ce qu'elle devrait être, mais l'écriture de la plupart des élèves est bien lisible, même meilleure que la qualité attendue en 6^{ème}. Il est donc possible que les élèves aient volontairement écrit lentement, privilégiant ainsi la lisibilité au détriment de la vitesse de leur écriture. Il est important de rappeler que le BHK, qui est un test développé par des psychomotriciens (Soppelsa et Albaret, 2012), a été étalonné en passation individuelle, alors que nous l'avons fait passer à toute la classe collectivement. Ce contexte de passation différent pourrait également expliquer la vitesse d'écriture plus faible. Néanmoins, les passations s'étant déroulées sous la surveillance de plusieurs expérimentateurs, les élèves étant calmes et concentrés, nous ne pensons pas que les scores obtenus aient été fortement influencés par les conditions non standard de passation du BHK. Quoi qu'il en soit, la conclusion à tirer des scores d'orthographe et d'écriture du français est que ces élèves qui sont sur le point d'apprendre une nouvelle langue basée sur un nouveau système graphique ne maîtrisent pas encore parfaitement la langue française à l'écrit. Nous reviendrons sur ce point au cours de la discussion.

Pour que soit pertinente la comparaison des résultats des deux groupes, MAN et CLA, qui vont être présentés et discutés dans ce qui suit, il était crucial de s'assurer au préalable que les deux groupes ne différaient pas significativement dans leur maîtrise du français.

Comparaison des groupes MAN et CLA : Le groupe MAN et le groupe CLA ne présentaient pas de différence dans le niveau initial en littérature du français, ni pour le niveau en orthographe ($\beta=0.60$, $SE=1.31$, $t=0.46$, $p=0.65$), ni pour la fréquence d'inscription du BHK ($\beta=19.41$, $SE=13.82$, $t=1.4$, $p=0.165$), ni pour la lisibilité de l'écriture ($\beta=1.14$, $SE=1.05$, $t=1.08$, $p=0.282$).

Niveau initial en arabe

Sur les 72 élèves, 14 n'avaient jamais eu de cours d'arabe avant l'entrée au collège, 13 en avaient déjà suivi en primaire, 22 en activité extra-scolaire et 23 dans les deux contextes (voir figure 33).

Au tout début de l'étude (T0), nous avons demandé aux élèves d'écrire à la main sur une feuille toutes les lettres arabes qu'ils connaissaient. Le nombre de lettres arabes connues allait de 0 à 28 (la totalité). 13 élèves en connaissaient 0, 17 en connaissaient entre 1 et 5, 19 entre 6 et 10, 10 entre 11 et 20 et 12 en connaissaient plus de 20 (voir figure 33).

Nous avons également testé la connaissance de la forme visuelle des différents allographes des lettres arabes (allo-lettre). A T0, nous avons effectué un test dans lequel une lettre était présentée isolée puis était suivie d'un mot. L'élève devait dire si la lettre qu'il avait vue était présente dans le mot. Dans la moitié des essais, la bonne réponse ne pouvait être donnée qu'en connaissant l'allographe et les règles de liaisons. Le nombre moyen de réponses correctes était de 51.7% ($sd=26.2$, $min=0$, $max=100$). La distribution des données ne s'écartait pas de 50% ($t(66)=0.620$). 10 élèves répondaient avec un score de 70 à 80 % de réponses correctes et 11 élèves répondaient correctement dans plus de 80% des essais (voir figure 33).

Le niveau initial en arabe était très hétérogène. La majorité des élèves avaient déjà au moins quelques notions en littérature de l'arabe. Bien que 58 élèves rapportaient avoir déjà

suivi des cours d'arabe, seuls 22 d'entre eux connaissaient plus de 10 des 28 lettres arabes, et seuls 21 élèves reconnaissent les différents allographes des lettres dans plus de 70% des cas.

Comme l'étude était construite sur la comparaison de deux groupes de débutants et que finalement une partie des élèves ne l'étaient pas, il était indispensable pour nous de vérifier que, malgré la diversité des niveaux initiaux des élèves, la répartition dans les deux groupes était correcte et que ces groupes n'avaient pas un niveau initial différent.

Comparaison entre le groupe MAN et CLA : La comparaison des deux groupes est représentée dans la figure 33. La répartition des élèves, selon qu'ils aient ou pas bénéficié des cours, dans un contexte ou un autre, n'était pas significativement différente entre les deux groupes ($X^2(4)=6$, $p=0.120$). Par ailleurs, l'analyse de la comparaison entre les groupes à T0 n'a montré aucune différence significative dans le niveau initial de lettres connues ($\beta=1.82$, $SE=2.01$, $t=0.91$, $p=0.368$) ni dans le nombre d'allographe reconnus ($\beta=0.19$, $SE=0.34$, $z=-55$, $p=0.579$).

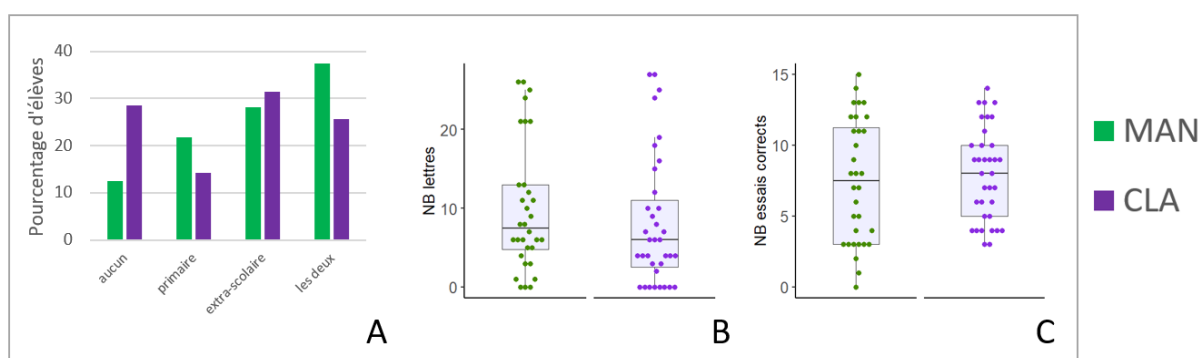


Figure 33 : Niveau initial en arabe sur l'ensemble du groupe. A. Apprentissage antérieur. B. Nombre de lettres connues. C. Nombre d'allographes reconnus. Pour les graphiques B et C, chaque point représente le score d'un élève, le segment central représente la médiane et les segments inférieur et supérieur représentent le premier et troisième quartile.

En conclusion, nous pouvions considérer que les deux groupes étaient équivalents au début de l'étude du point de vue de leur niveau initial en français et en arabe.

2.2. Evolution des connaissances des lettres arabes

2.2.1. Rappel libre de lettre : nb-lettre

A T0, T1 et T2, les élèves ont écrit sur une feuille de papier les lettres arabes qu'ils connaissaient. Nous avons cherché à savoir si le nombre de lettre connues et écrites était lié au mode d'apprentissage. Les résultats pour les deux groupes (MAN et CLA) et les trois moments de tests (T0, T1 et T2) sont rapportés dans le tableau 10 et présentés sur la figure 34.

	T0	T1	T1 - T0	T2	T2 - T0
MAN	9,9 (8.2)	17,1 (8.8)	+ 7,1 (5.2)	18,7 (7.7)	+ 8,9 (5.5)
CLA	8,1 (8.3)	18,5 (7.3)	+ 10,2 (6.3)	16,7 (7.6)	+ 8,2 (5.9)

Tableau 10 : Nombre moyen et différences entre tests des lettres produites en fonction du moment et du groupe. La valeur être parenthèse correspond à l'écart-type.

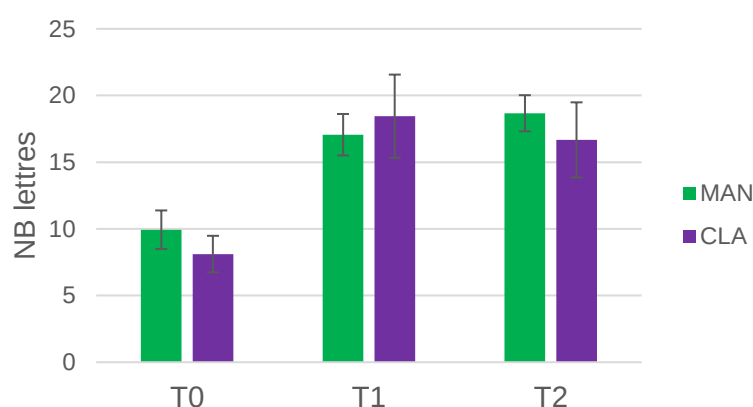


Figure 34 : Nombre de lettres produites en rappel libre en fonction du moment et du groupe. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard de la moyenne.

L'analyse a mis en évidence un effet principal du moment ($X^2(2)=241.28, p<0.001$). Les élèves ont écrit davantage de lettres à T1 qu'à T0 ($\beta= 8.55, SE=0.64, t(117)=13.446, p<0.001$) et à T2 qu'à T0. ($\beta= 8.74, SE=0.66, t(118)=13.18, p<0.001$). Le nombre de lettres

produites n'évoluait pas entre T1 et T2 ($\beta=0.19$, $SE=0.67$, $t(118)=0.28$, $p=0.778$). Cependant, il y avait une interaction entre le moment et le groupe ($X^2(2)=7.34$, $p=0.025$). Entre T0 et T1, le groupe CLA augmentaient davantage le nombre de lettres produites que le groupe MAN (respectivement + 10,34 et + 7,12 ; $\beta = 2.85$, $SE=1.27$, $t(117)=2.24$, $p= 0.027$). Entre T1 et T2, le groupe CLA diminuait alors que le groupe MAN augmentaient (respectivement -1.5 et +1,9 ; $\beta = 3.25$, $SE=1.35$, $t(118)=-2.42$, $p= 0.017$). Après correction pour comparaisons multiples, les différences entre les groupes aux trois moments n'étaient pas significatives.

Résumé :

Après 6 mois d'apprentissage il y avait une augmentation du nombre de lettres connues pour les deux groupes. De façon intéressante, les élèves écrivant au clavier pendant l'apprentissage étaient capables d'écrire les lettres à la main, bien qu'ils ne l'aient pas fait pendant les cours. Ces élèves augmentaient davantage le nombre de lettres connues que ceux du groupe MAN. Cependant, après 6 mois d'apprentissage supplémentaire en pratiquant l'écriture manuscrite, ces élèves perdaient cet avantage.

2.2.1.1. Lettres produites en miroir

Parmi les erreurs de production commises par certains élèves, se trouvaient des lettres de forme correcte, mais tracées en miroir. Nous avons effectué une analyse statistique sur le nombre de lettres produites en miroir, mais également sur les proportions d'élèves en ayant produit.

Analyse sur le nombre de lettres en miroir

Le nombre moyen de lettres produites en miroir est présenté dans le tableau 11 et la figure 35.

	T0	T1	T2
MAN	1.25 (1.48)	0.63 (1.31)	0.43 (0.88)
CLA	0.71 (1.43)	1.36 (1.85)	0.93 (1.26)

Tableau 11. Nombre moyen de caractères produits en miroir en fonction du groupe et du moment. La valeur entre parenthèse correspond à l'écart-type.

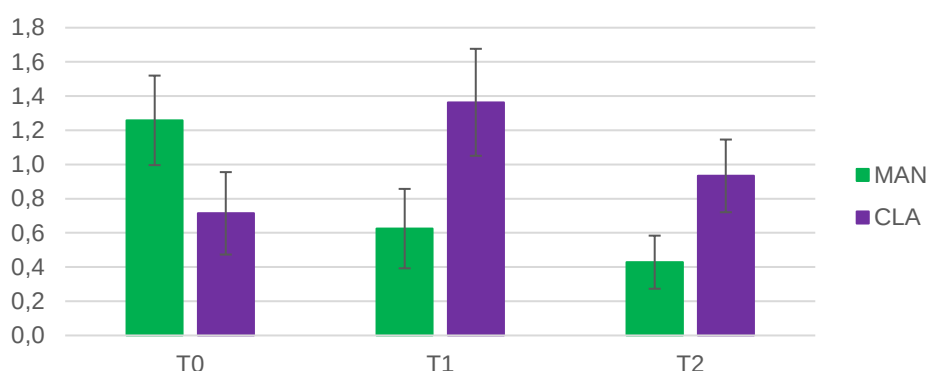


Figure 35. Nombre moyen de caractères produits en miroir en fonction du groupe et du moment. La valeur entre parenthèse correspond à l'écart-type. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard de la moyenne.

Il y a un effet du groupe sur le nombre de lettres produites en miroir : les élèves du groupe CLA produisent davantage de lettre en miroir que ceux du groupe MAN ($\beta=0.92$, $SE=0.43$, $z=2.12$, $p=0.034$). Il n'y a pas d'effet principal du moment ($X^2(2)=2.10$, $p=0.350$). Cependant il y a une interaction entre le moment et le groupe ($X^2(2)=7.96$, $p=0.019$) : les élèves du groupe CLA ont tendance à augmenter le nombre d'erreur entre T0 et T1 par rapport au groupe MAN qui a tendance à diminuer (respectivement $+0.73$ et -0.63 , $\beta=1.42$, $SE=0.56$, $z=-2.534$, $p=0.011$). Entre T1 et T2, les élèves ne s'améliorent pas ($\beta=0.36$, $SE=0.31$, $z=1.17$, $p=0.243$) et ceux pour les deux groupes ($\beta=0.05$, $SE=0.61$, $z=0.9$, $p=0.930$). Après correction pour comparaisons multiples, les tests post-hoc ne révèlent pas de différence entre les groupes aux trois moments.

Analyse sur le nombre d'élèves produisant des lettres en miroir

La proportion d'élèves ayant produit des lettres en miroir en fonction du groupe et du moment est rapportée dans le tableau 12 et la figure 36. A T0, 28 élèves en ont produit, à T1 24 élèves et à T2 20 élèves. Ces élèves en produisaient en moyenne 2.8 (sd=1.42, min=1 max = 7). Nous avons testé si le nombre d'élèves produisant des lettres en miroir était lié au mode d'apprentissage.

	T0	T1	T2
MAN	53,13 %	25,00 %	25,00 %
CLA	31,43 %	48,48 %	43,33 %

Tableau 12 : Pourcentage d'élèves qui ont tracé des lettres en miroir, en fonction du moment et du groupe.

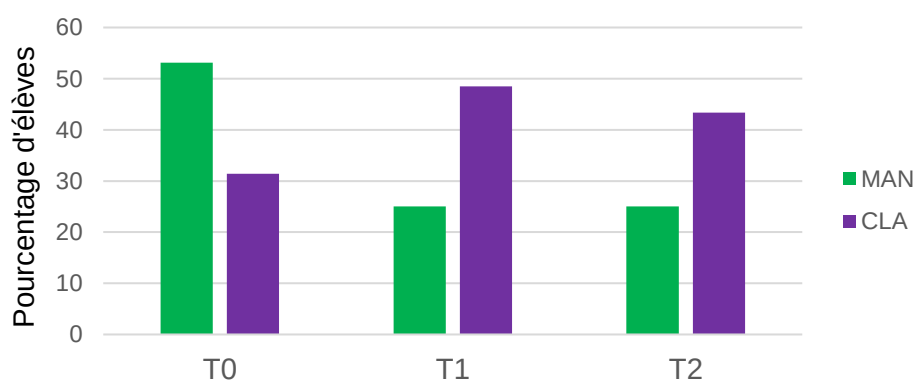


Figure 36 : Pourcentage d'élèves produisant des lettres en miroir en fonction du moment et du groupe.

L'analyse n'a pas mis en évidence d'effet du moment du test ($X^2(1)=1.00$, $p=0.606$) mais un effet du groupe : davantage d'élèves du groupe CLA écrivaient des lettres en miroir relativement au groupe MAN ($\beta=1.42$, $SE=0.059$, $z=2.41$, $p=0.016$).

Cependant, il y avait une interaction entre le groupe et le moment ($X^2(2)=9.70$, $p=0.008$). Entre T0 et T1, le nombre d'élèves qui produisaient des lettres en miroir

augmentait pour le groupe CLA, alors qu'il diminuait pour le groupe MAN ($\beta=2.35$, $SE=0.80$, $z=-2.95$, $p=0.003$). Entre T1 et T2 les élèves n'évoluaient pas ($\beta=0.26$, $SE=0.41$, $z=0.63$, $p=0.526$), et ceux de la même façon pour les deux groupes ($\beta=0.47$, $SE=0.81$, $z=0.58$, $p=0.560$). Après correction pour comparaisons multiples, les différences entre les groupes n'étaient pas significatives à T0, T1 et T2.

Résumé :

Les résultats montrent que lorsqu'ils écrivent les lettres qu'ils connaissent, les élèves tracent parfois des lettres en miroir. Le nombre de lettres ainsi tracées diminue avec l'apprentissage, surtout pour les élèves qui apprennent à la main. Environ 40% des élèves produisent des lettres en miroir à la rentrée en 6^{ème} (T0). Après 6 mois d'apprentissage (T1), ce nombre diminue de 30% pour le groupe MAN alors qu'il augmente de 23% dans le groupe CLA. Dans le groupe CLA, 6 mois d'apprentissage manuscrit supplémentaire (T2) ne permettent toujours pas de diminuer le nombre d'élèves qui tracent des lettres en miroir.

2.2.1.2. Sens d'écriture

Dans le test de rappel libre, les élèves écrivaient les lettres qu'ils connaissaient sur les lignes d'une feuille de papier. Quand il y avait suffisamment de lettres écrites, nous avons pu estimer dans quel sens, droite-gauche ou gauche-droite, étaient produites les lettres. A T0, le sens dans lequel les lettres étaient produites a pu être défini chez 53 élèves, à T1 chez 60 et à T2 chez 58. Nous avons testé si le nombre d'élèves écrivant les lettres dans la bonne direction était lié au mode d'apprentissage. La proportion d'élèves ayant écrit les lettres dans le sens correct (droite à gauche) est rapportée dans le tableau 13 et présentée sur la figure 37.

	T0	T1	T2
MAN	38.46 %	58.62 %	67.86 %
CLA	62.96 %	51.61 %	46.67 %

Tableau 13 : Pourcentage d'élèves produisant les lettres dans le sens droite-gauche en fonction du moment et du groupe.

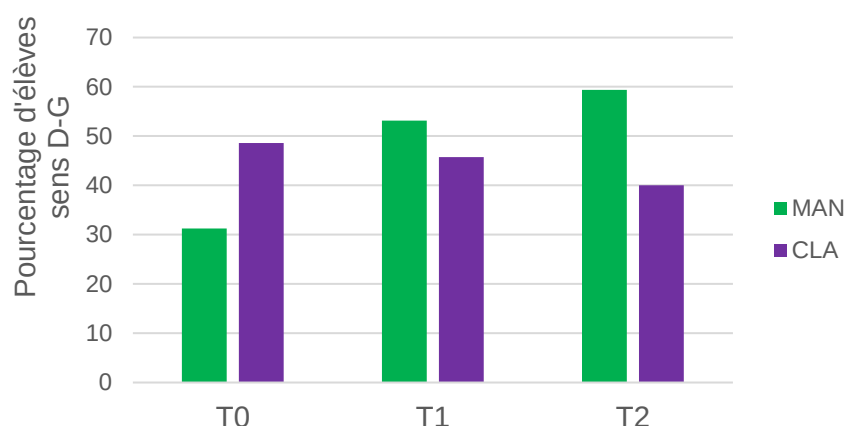


Figure 37 : Pourcentage d'élèves produisant les lettres dans le sens droite-gauche en fonction du moment et du groupe.

Le nombre d'élèves produisant les lettres dans le sens droite-gauche ne dépendait ni du groupe ($\beta=0.17$, $E=1.12$, $z=0.16$, $p=0.876$), ni du moment ($X^2(2)=3.93$, $p=0.140$). Cependant, il y avait une interaction entre le groupe et le moment ($X^2(1)=8.32$, $p=0.016$). Comme on peut le voir sur la figure 37, le nombre d'élèves écrivant dans le sens correct était en augmentation entre T0 et T2 pour le groupe MAN alors qu'il diminuait pour le groupe CLA ($\beta= 4.37$, $SE=1.52$, $z=-2.88$, $p=0.004$). Cette différence n'était que marginale entre T0 et T1 ($\beta=2.11$, $SE=1.22$, $z=1.4n$, $p=0.083$) et T1 et T2 ($\beta= 2.25$, $SE=1.29$, $z=-1.74$, $p=0.081$). Les tests post-hoc corrigés pour comparaisons multiples n'ont pas révélé pas de différence significative entre les groupes à chaque moment.

Résumé :

Seuls 50% des élèves écrivent les lettres dans le sens correct d'écriture de l'arabe et cette proportion reste stable de T0 à T2. Toutefois, la proportion d'élèves qui écrit les lettres

dans le sens correcte augmente avec le temps dans le groupe MAN alors qu'elle décroît dans le groupe CLA.

2.2.2. Copie de mots avec le stylet

Les élèves ont réalisé une tâche de copie de mots sur tablette aux trois moments T0, T1 et T2. A T0, 10 mots étaient présentés en lettres liées (condition facile). A T1 et T2, 5 mots ont été présentés en condition facile et 5 mots ont été présentés en lettres isolées, que l'élève devait attacher pour écrire le mot (condition difficile). Dans ce test, nous analysons l'effet du groupe sur deux variables : tout d'abord la durée d'écriture moyenne des lettres composant les mots dans la condition facile (à T0, T1 et T2), puis le nombre d'erreur produite en fonction de la condition facile et difficile (à T1 et T2).

2.2.2.1. Durée d'écriture (en condition 'facile')

Pour chaque essai, à T0, T1 et T2, nous avons calculé la durée moyenne d'écriture d'une lettre en divisant la durée totale d'écriture du mot par le nombre de lettres le composant. Les durées moyennes pour les deux groupes et les trois moments de test sont rapportées dans le tableau 14 et la figure 38.

	T0	T1	T2
MAN	3.361 (1.327)	2.406 (0.754)	2.303 (0.790)
CLA	3.517 (1.017)	3.133 (1.148)	2.501 (0.936)

Tableau 14 : Durée d'écriture moyenne (en secondes) pour produire une lettre dans un mot en fonction du moment et du groupe. La valeur être parenthèse correspond à l'écart-type.

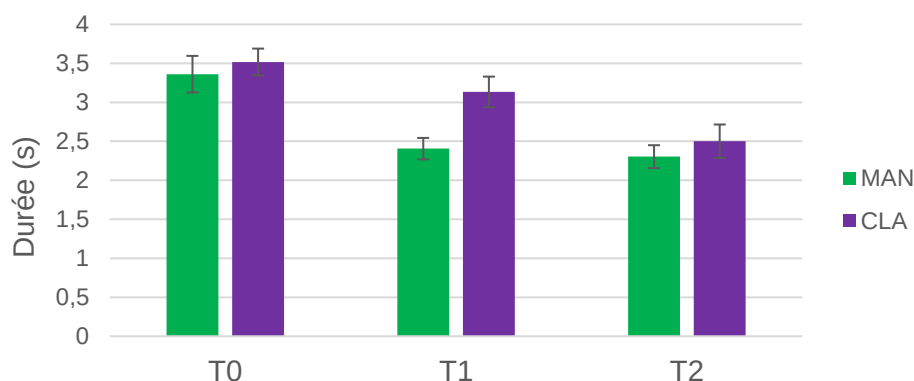


Figure 38 : Durée moyenne d'écriture d'une lettre en fonction du moment et du groupe. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard de la moyenne.

L'analyse a révélé un effet du moment ($X^2(2)=220.34$, $p<0.001$) : les élèves écrivent plus rapidement à T1 qu'à T0 ($\beta= 0.783$, $SE=0.078$, $t(858.30)=10.03$, $p<0.001$) et à T2 qu'à T1 ($\beta= 0.385$, $SE=0.071$, $t(891.16)=-5.43$, $p<0.001$). Il y avait également un effet significatif du groupe : les élèves du groupe MAN écrivent plus rapidement que ceux du groupe CLA ($\beta=0.658$, $SE=0.230$, $t(82.87)=2.85$, $p=0.005$).

Par ailleurs, l'analyse a révélé une interaction entre le groupe et le moment ($X^2(2)=11.33$, $p=0.003$) : entre T0 et T1, la vitesse d'écriture augmentait dans le groupe MAN ($\beta= 0.949$, $SE=0.108$, $t(903.6)=-8.79$, $p<0.001$) et dans le groupe CLA ($\beta=0.618$, $SE=0.951$, $t(880.6)=-6.50$, $p<0.001$), mais les élèves du groupe MAN augmentaient davantage leur vitesse que ceux du groupe CLA ($-948.6ms$ et $-617.9ms$ par lettre respectivement, $\beta= 0.331$, $SE=0.129$, $t(894.62)=-2.57$, $p=0.010$). Entre T1 et T2, c'est au contraire le groupe CLA qui a augmenté davantage sa vitesse que le groupe MAN ($-611.2ms$ et $-158.1ms$ respectivement, $\beta= 0.453$, $SE=0.142$, $t(890.42)= 3.20$, $p=0.001$). En effet, il n'y avait pas de différence entre les deux groupes à T0 ($\beta= 0.327$, $SE=0.226$, $t(75.9)=1.45$, $p=0.698$), , à T1, les élèves du groupe MAN avaient tendance à écrire plus rapidement que le groupe CLA mais cette différence n'était que marginale ($\beta= 0.658$, $SE=0.231$, $t(82.4)=-2.85$, $p=0.059$) et cette différence disparaît à T2 où les élèves du groupe CLA ont rattrapé ceux du groupe MAN ($\beta= 0.205$, $SE=0.234$, $t(87.2)=-0.88$, $p=0.951$).

Résumé :

D'une manière générale, et malgré une amélioration au fil du temps, les élèves recopient

très lentement les mots arabes (de 2 à 3 sec par lettre). Pour les élèves ayant appris à la main, la durée d'écriture moyenne des lettres diminue entre T0 et T1, puis reste stable entre T1 et T2. De façon intéressante, les élèves ayant appris au clavier présentent également une diminution de la durée d'écriture entre T0 et T1, même si celle-ci est moins forte que pour le groupe ayant appris à la main. Après 6 mois d'écriture à la main, les élèves ayant commencé l'apprentissage au clavier écrivent à une vitesse comparable à ceux du groupe MAN.

2.2.2.2. Analyse des erreurs en copie 'facile' et 'difficile'

La comparaison entre le nombre d'essais correctement écrit en condition facile et difficile permettait d'estimer la difficulté induite par la nécessité de faire correspondre une lettre sous sa forme isolée à sa forme liée, en tenant compte de sa position dans le mot. Elle évaluait donc la correspondance allographique et l'apprentissage des règles de liaisons. A T0, seuls les mots en condition 'facile' (liés) ont été présentés, donc ce moment de test n'est pas pertinent dans cette comparaison. A T1 et T2, la moitié des mots (5) étaient faciles à écrire et l'autre moitié (5) était difficile. Chaque mot a été noté 1, s'il était correct, ou 0 s'il présentait une erreur. Le nombre de mots correctement copiés par les deux groupes, dans les deux conditions et aux deux moments de test, est rapporté dans le tableau 15 et représenté sur la figure 39.

Moment	T1		T2	
Condition	Facile	Difficile	Facile	Difficile
MAN	4.53 (0.78)	2.07 (1.57)	4.53 (1.81)	2.13 (1.54)
CLA	4.62 (0.65)	1.41 (1.49)	4.37 (1.33)	1.23 (1.53)

Tableau 15 : Nombre moyen de mots correctement écrits à la main (sur 5) en fonction du groupe, du modèle (facile/difficile) et du moment. La valeur entre parenthèse correspond à l'écart-type.

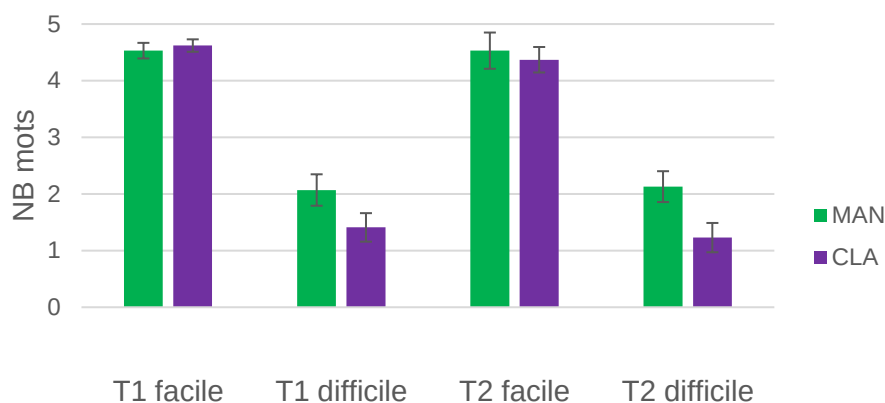


Figure 39 : Nombre de mots correctement écrits en fonction de la condition de présentation du modèle (facile et difficile), du groupe et du moment. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard de la moyenne.

L'analyse statistique n'a pas mis en évidence d'effet du moment ($\beta = 0.15$, $SE = 0.16$, $z = 0.90$, $p = 0.368$), ni du groupe ($\beta = 0.34$, $SE = 0.26$, $z = 1.35$, $p = 0.177$). Cependant, il y avait un effet significatif de la condition : lorsque le modèle était présenté en lettres liées (facile), les élèves produisaient davantage de mots corrects que lorsqu'il était présenté en lettres isolées (difficile) ($\beta = 3.29$, $SE = 0.37$, $z = 9.00$, $p < 0.001$). Cela est vrai pour les élèves du groupe MAN ($\beta = 2.75$, $SE = 0.39$, $z = 6.97$, $p < 0.001$) et ceux du groupe CLA ($\beta = 3.82$, $SE = 0.41$, $z = 9.39$, $p < 0.001$).

Il y avait toutefois une interaction significative entre le groupe et la condition : la diminution de performance en condition difficile, relativement à la condition facile, était moindre pour les élèves du groupe MAN que pour ceux du groupe CLA ($\beta = 1.07$, $SE = 0.34$, $z = 3.15$, $p < 0.002$). En condition 'facile', il n'y avait pas de différence entre les deux groupes ($\beta = 0.19$, $SE = 0.33$, $z = 0.59$, $p = 0.937$) alors qu'en condition 'difficile', les élèves du groupe MAN produisaient davantage de mots corrects ($\beta = 0.89$, $SE = 0.28$, $z = 3.15$, $p = 0.009$). Il n'y avait pas d'interaction significative entre le groupe et le moment ($\beta = 0.54$, $SE = 0.32$, $z = 1.68$, $p = 0.093$), ni de d'interaction entre le groupe, le moment et la condition ($\beta = 0.60$, $SE = 0.64$, $z = 0.95$, $p = 0.342$).

Résumé :

Dans la condition 'facile', où il suffit de recopier le modèle affiché (avec la possibilité de le faire 'en le dessinant'), les performances sont bonnes et il n'y a pas de différence entre le groupe MAN et le groupe CLA. Par contre, en condition difficile, lorsque le modèle est présenté en lettres isolées, et qu'il faut retrouver les bons allographes, les performances baissent pour les deux groupes, mais davantage pour le groupe CLA que pour le groupe MAN. Cela est vrai à T1 et ça le reste à T2. En effet, les performances n'évoluent pas entre T1 et T2.

2.2.3. Copie de mots au clavier

Ce test était construit de façon similaire au précédent. Les élèves devaient recopier en utilisant le clavier 5 mots présentés en lettres isolées (condition 'facile' cette fois-ci car les lettres isolées correspondent aux allographes sur les touches du clavier) et 5 mots en lettres attachées (condition 'difficile' car il faut faire correspondre la lettre présentée dans sa forme liée à sa forme isolée sur le clavier). Ce test teste donc également l'association allographique. Ce test n'a été passé qu'à T1, à la fin de l'apprentissage différencié. Le nombre de mots correctement copiés par les deux groupes et dans les deux conditions est rapporté dans le tableau 16 et représenté sur la figure 40.

	Facile	Difficile
MAN	4.13 (1.31)	3.25 (1.90)
CLA	4.91 (0.28)	3.83 (1.20)

Tableau 16 : Nombre moyen de mots correctement écrits au clavier en fonction de la condition et du groupe. La valeur entre parenthèse correspond à l'écart-type.

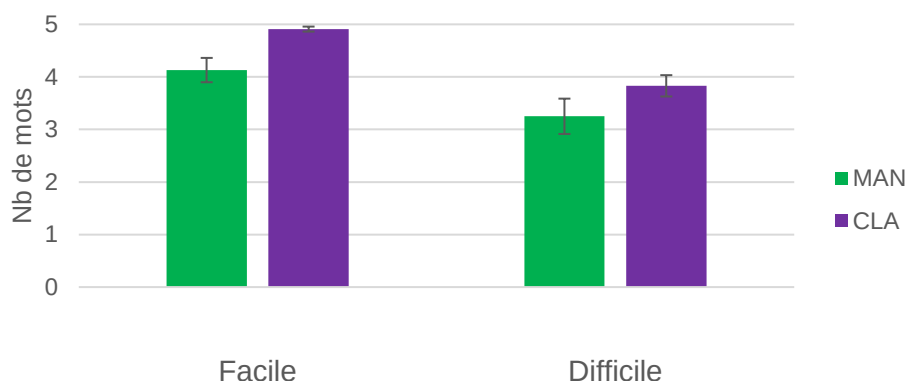


Figure 40 : Nombre de mots écrits correctement en fonction du groupe et de la condition de présentation du modèle (facile et difficile) dans le test de copie au clavier. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard de la moyenne.

L'analyse a révélé un effet principal du groupe : les élèves du groupe CLA copient davantage de mots correctement que ceux du groupe MAN ($\beta=2.07$, $SE= 0.55$ $z=3.763$, $p<0.001$). Elle a aussi mis en évidence un effet principal de la condition : les élèves écrivaient plus de mots dans la condition 'facile', lorsque le modèle est présenté en lettres isolées, que dans la condition 'difficile', lorsqu'il est en lettres attachées ($\beta=2.65$, $SE=0.74$, $z=3.60$, $p=0.001$).

Cependant, il y avait une interaction entre le groupe et la condition : Les élèves du groupe CLA avaient une performance qui chute davantage quand la condition est 'difficile' par rapport à ceux du groupe MAN ($\beta=1.89$, $SE=0.76$, $z=2.49$, $p=0.013$). En condition 'facile', les élèves du groupe CLA produisent davantage de mots que ceux du groupe MAN ($\beta=3.02$, $SE=0.80$, $z=3.77$, $p<0.001$). En condition 'difficile', la différence entre les deux groupes n'est plus significative ($\beta=1.13$, $SE= 0.5$, $z=2.23$, $p=0.116$). En effet, le groupe CLA écrivait correctement moins de mots en condition difficile qu'en condition facile ($\beta=3.6$, $SE=0.91$, $z=3.91$, $p<0.001$). Cette diminution n'était pas significative pour le groupe MAN ($\beta=1.71$, $SE=0.73$, $z=2.35$, $p=0.086$).

Résumé :

Dans la tâche facile, où il suffit de frapper les touches qui correspondent aux lettres isolées présentées dans le modèle, les enfants qui ont appris au clavier sont meilleurs que ceux qui n'ont jamais utilisé le clavier : ils connaissent probablement mieux la position des

lettres sur le clavier. Cependant, cet avantage ne se retrouve plus lorsque la tâche requiert un processus cognitif supplémentaire et coûteux : retrouver la forme isolée des lettres. Au contraire, la performance du groupe CLA chute et bien qu'ils aient toujours cette meilleure connaissance du clavier, ils sont au même niveau que le groupe MAN.

2.2.4. Miroir-lettre

Ce test, effectué à T1 et T2, consistait à déterminer si un stimulus visuel présenté rapidement était une lettre arabe ou pas. Parmi les stimuli, 15 était des lettres arabes présentées en miroir. L'analyse a porté spécifiquement sur ces stimuli et permet donc d'étudier la connaissance de l'orientation visuo-spatiale des lettres. Les nombres moyens de réponses correctes en fonction du moment et du groupe sont rapportés dans le tableau 17 et présentés sur la figure 41.

	T1	T2
MAN	9.53 (4.61)	11.03 (3.94)
CLA	8.97 (3.55)	11.21 (2.59)

Tableau 17 : Nombre moyen d'essais corrects (sur 15) par groupe à T1 et T2 pour les essais en miroir de la tâche miroir-lettre. La valeur entre parenthèse correspond à l'écart-type.

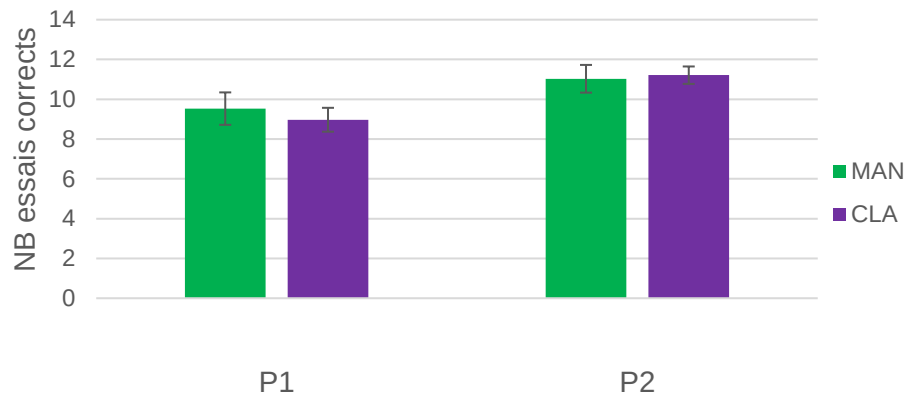


Figure 41 : Nombre de réponses correctes à miroir-lettre (sur 15) en fonction du moment et du groupe.
Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard de la moyenne.

Comme ce test demandait une réponse par 'oui' ou 'non', le taux de réponses au hasard était de 50%. A T1, le pourcentage de bonnes réponses était au-dessus du hasard (9.25/15 lettres, soit 61.66% ; $t(65)=3.47$, $p<0.001$) et à T2, (11.12/15 lettres, soit 74.13%) $t(60)=7.26$, $p<0.001$).

Il n'y avait pas d'effet du groupe : le nombre de confusions était le même quel que soit l'apprentissage qui a précédé ($\beta=0.15$, $SE=0.28$, $z=0.56$, $p=0.575$). Il y avait un effet du moment : les élèves faisaient moins de confusions en miroir à T2 qu'à T1 ($\beta=0.89$, $SE=0.17$, $z=5.33$, $p<0.001$). L'interaction entre le groupe et le moment n'était pas significative ($\beta=0.05$, $SE=0.28$, $z=0.19$, $p=0.847$).

Résumé :

Après 6 mois d'apprentissage (T1), les élèves différenciaient les lettres de leur en image en miroir, mais difficilement (avec presque 40% d'erreurs), et cela était vrai pour les deux groupes, quel que soit l'apprentissage qui avait précédé. Après 12 mois d'apprentissage (T2), les élèves se sont améliorés mais font encore en moyenne 26% d'erreur. Cette amélioration est de même ampleur pour les deux groupes.

2.2.5. Reconnaissance visuelle des allographes

Dans ce test, l'élève devait décider si une lettre, qui était d'abord présentée seule, était contenue ou pas dans le mot affiché ensuite. Comme la complexité du test a été augmentée entre T0, T1 et T2, nous n'avons pas comparé directement les 3 moments de tests mais nous avons effectué une comparaison 2 à 2 des tests les plus comparables car les plus proches dans le temps. Nous avons donc comparé dans un premier temps T0 et T1, puis dans un second temps T1 et T2.

2.2.5.1. Comparaison T0 et T1

L'analyse entre T0 et T1 a été faite sur les 15 essais difficiles (lorsque la reconnaissance de la lettre ne pouvait se faire que si l'on connaissait les allographes de cette lettre) qui étaient communs aux deux moments. Les nombres moyens de réponses correctes pour les deux groupes et les deux moments de test sont présentés dans le tableau 18 et la figure 42. A T0, le pourcentage de bonnes réponses n'est pas significativement différent du hasard, (7,7/15 soit 51.54%, $t=0.49$, $p=0.620$). A T1 ce pourcentage augmente et se différencie significativement du hasard (11,1/15 soit 76%, $t=12.39$, $p<0.001$).

	T0	T1
MAN	7.47 (4.35)	10.72 (2.92)
CLA	7.97 (3.28)	11.49 (2.99)

Tableau 18: Nombre moyen de réponses correctes à allo-lettre dans la condition 'difficile' (sur 15). La valeur entre parenthèse correspond à l'écart-type.

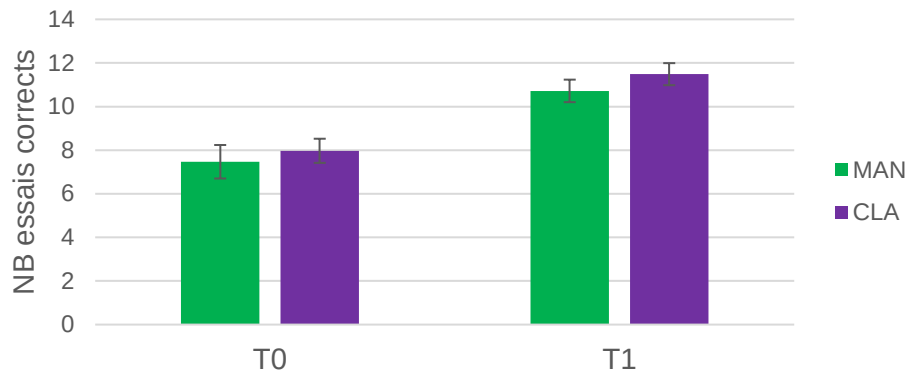


Figure 42 : Nombre de réponses correctes à allo-lettre en fonction du moment et du groupe.

L'analyse statistique a mis en évidence un effet du moment ($\beta=1.26$, $SE=0.12$, $z=10.73$, $p<0.001$) : les élèves donnent davantage de bonnes réponses à T1 qu'à T0 ($\beta=1.26$, $SE=0.12$, $z=10.73$, $p<0.001$). En revanche, l'effet du groupe n'était pas significatif ($\beta=0.15$, $SE=0.29$, $z=0.53$, $p=0.594$). Il n'y avait pas non plus d'interaction entre le groupe et le moment ($\beta=0.10$, $SE=0.22$, $z=0.43$, $p=0.667$).

Résumé :

La connaissance des allographes s'est améliorée de la même façon après 6 mois d'apprentissage à la main ou au clavier. Cependant les élèves font encore un nombre important d'erreurs, dans un tiers des essais.

2.2.5.2. Comparaison T1 et T2

A T2, la tâche avait été rendue plus complexe, en plus de l'association allographique, que nous supposons acquise après 1an et demi d'apprentissage nous testions ici la capacité des élèves à maintenir en mémoire de travail différentes lettres. En effet, à T1, une lettre était présentée en premier puis le mot qui pouvait la contenir sous un autre allographe était présenté à la suite. A T2 le mot était présenté en premier et la lettre ensuite. Par conséquent, à T2 pour savoir si la lettre était présente dans le mot, il fallait préalablement mémoriser les différentes lettres du mot puis les comparer avec la lettre isolée cible. Les nombres moyens de réponses correctes aux essais difficiles (sur 30) pour les deux groupes et les deux moments de test sont présentés dans le tableau 19 et la figure

43. A T1 et à T2, les pourcentages moyens de bonnes réponses étaient significativement différents du hasard (respectivement 73%, $t=9.84$, $p<0.001$ et 69%, $t=7.20$, $p<0.001$).

	T1	T2
MAN	21.13 (6.29)	20.79 (5.84)
CLA	22.51 (5.10)	20.79 (5.29)

Tableau 19 : Nombre moyen de réponses correctes à allo-lettre (sur 30) en fonction du moment et du groupe.

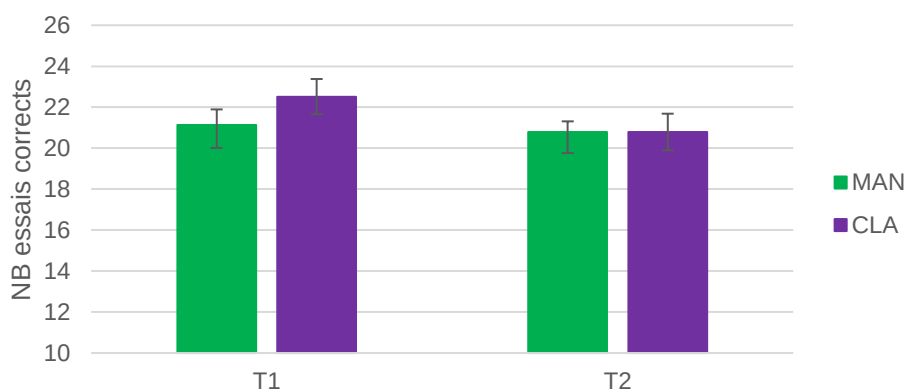


Figure 43 : Nombre de réponses correctes aux essais difficiles de la tâche allo-lettre en fonction du moment et du groupe. La valeur être parenthèse correspond à l'écart-type.

L'analyse a montré un effet du moment, et donc de la tâche : les élèves étaient moins performants à T2 qu'à T1 ($\beta=0.19$, $SE=0.09$, $z=2.06$, $p=0.039$). En revanche, il n'y avait pas d'effet principal du groupe ($\beta=0.13$, $SE=0.19$, $z=0.72$, $p=0.469$). Toutefois, il y avait une interaction entre le groupe et le moment ($\beta=0.47$, $SE=0.19$, $z=2.55$, $p<0.011$). Le groupe CLA diminuait significativement entre T1 et T2 ($\beta=0.43$, $SE=0.14$, $z=2.99$, $p=0.015$) alors que pour le groupe MAN la différence n'était pas significative ($\beta=0.05$, $SE=0.12$, $z=0.38$, $p=0.981$). Les analyses post-hoc corrigées pour comparaisons multiples n'ont pas révélé de différence entre les groupes à T1 et T2.

Résumé :

Nous avons observé une augmentation du nombre d'allographes reconnus entre T0 et T1. Le mode d'écriture utilisé pendant l'apprentissage ne semble pas avoir eu d'effet dans ce test perceptif. A T2, les élèves étaient moins performants qu'à T1 car la difficulté de la tâche était augmentée. Cependant, cette baisse de performance n'était pas la même pour les deux groupes : le groupe CLA, qui était légèrement meilleur à T1, était plus affecté que le groupe MAN, bien que les deux groupes ne se différencient pas à T2.

2.2.6. Phono-lettre

Dans ce test, nous avons demandé aux élèves de « transcrire phonologiquement » les lettres, c'est-à-dire d'écrire la lettre française correspondant au son, ou au nom, de la lettre arabe. Ce test a été effectué à T1 et T2. Le nombre d'associations phonologiques correctes (sur 12) dans les deux groupes et pour les deux moments de test est rapporté dans le tableau 20 et figure 44. Globalement, à T1 et T2, les élèves connaissaient la correspondance phonologique de 8.6 lettres sur 12, soit 71% des lettres arabes qui leur étaient proposées.

	T1	T2
MAN	8.21 (4.62)	8.96 (4.17)
CLA	9.03 (3.04)	7.93 (4.12)

Tableau 20 : Nombre moyen (écart-type) de lettres transcrites phonologiquement (sur un total de 12) en fonction du moment et du groupe. La valeur entre parenthèse correspond à l'écart-type.

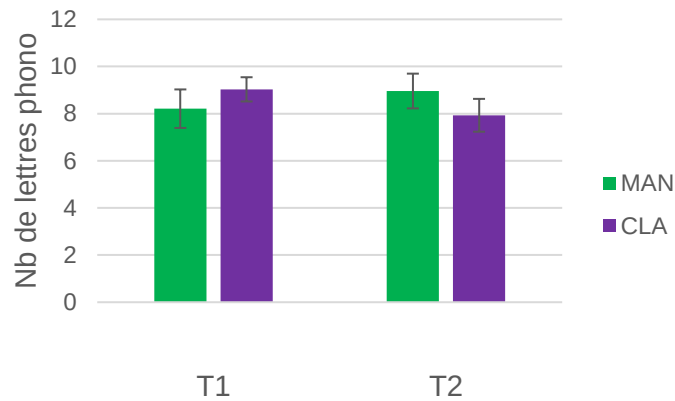


Figure 44 : Nombre de lettres transcrites phonologiquement en fonction du moment et du groupe.

L'analyse statistique n'a pas mis en évidence d'effet principal du groupe ($\beta=0.18$, $SE=0.69$, $t(63)=0.26$, $p=0.795$), ni du moment ($\beta=0.19$, $SE=0.39$, $t(59)=0.49$, $p=0.627$). Cependant elle a révélé une interaction entre le moment et le groupe : les élèves du groupe CLA diminuaient le nombre de lettres transcrites entre T1 et T2 alors que c'était l'inverse pour les élèves du groupe MAN ($\beta= 2.09$, $SE=0.78$, $t(59.37)=-2.67$, $p=0.010$). Les tests post-hoc ne rapportaient pas de différences significatives entre les groupes à T1 et à T2.

Résumé :

Après 6 mois d'apprentissage, les élèves ne connaissent la forme phonologique en moyenne que 72% des lettres testées. Cette connaissance n'évoluait pas après 6 mois d'apprentissage supplémentaire). Cependant le groupe ayant écrit au clavier pendant les 6 premiers mois avait tendance à oublier de lettres alors que c'était l'inverse dans le groupe ayant commençais l'apprentissage à la main. Il semble que la connaissance phonologique de la lettre soit plus stable à long terme chez les élèves qui ont d'abord appris les lettres en les écrivant à la main que chez ceux ayant commencé au clavier.

2.2.7. Sens de lecture

Ce test consistait à cocher les occurrences d'une lettre cible présentée sous sa forme isolée dans une phrase. Le sens de progression des lettres cochées était évalué et considéré comme correct s'il correspondait au sens de lecture de l'arabe (de droite à

gauche) et comme incorrect s'il correspond au sens de lecture du français (de gauche à droite) ou s'il était fait de façon aléatoire. Il y avait 2 phrases, une « facile » où la lettre cible apparaissait dans sa forme isolée à différentes positions de la phrase et une difficile où la lettre apparaissait dans sa forme liée à différente position et dans sa forme isolée seulement en fin de phrase (à gauche). La présence de la lettre isolée dans la phrase, identique à la lettre cible, servait d'attracteur perceptif. La variable dépendante était le nombre d'élèves qui parcouraient la phrase de droite à gauche par rapport à ceux le faisant dans le sens inverse ou de façon aléatoire. Les résultats sont rapportés dans le tableau 21 et sur la figure 45.

	T1		T2	
	phrase1	phrase2	phrase1	phrase2
MAN	77,42%	64.29%	67,86%	68.00%
CLA	65,71%	66.67%	83.33%	77.78%

Tableau 21 : Pourcentage d'élèves recherchant dans le sens D-G, en fonction du groupe, de la phrase et du moment

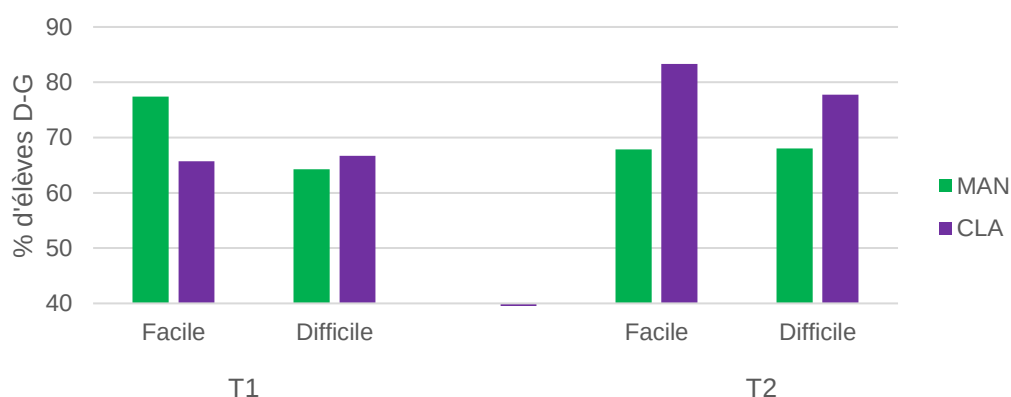


Figure 45 : Pourcentage d'élèves recherchant la lettre dans la phrase de la droite vers la gauche, en fonction du moment, du groupe et de la phrase (phrase1 : facile, phrase2 : difficile).

L'analyse n'a pas révélé d'effet du moment ($\beta=0.34$, $SE=0.46$, $z=0.75$, $p=0.454$), ni du type de la phrase ($\beta=0.78$, $SE=0.44$, $z=1.78$, $p=0.076$), ni du groupe ($\beta=0.76$, $SE=0.75$, $z=1.01$, $p=0.311$).

Malgré ce que pourrait laisser penser la figure 45, l'analyse n'a pas révélé d'interaction entre le groupe et le moment ($\beta=1.15$, $SE=0.91$, $z=1.26$, $p=0.207$), ni d'interaction entre le groupe et le type de phrase ($\beta=0.71$, $SE=0.87$, $z=0.82$, $p=0.410$).

Résumé :

60% seulement des élèves semblent avoir acquis le sens droite-gauche de lecture de l'arabe. Cette proportion n'évolue pas entre T1 et T2 et ne dépend pas du mode d'écriture utilisé pendant les 6 premiers mois de l'apprentissage.

2.2.8. Lecture de mots

2.2.8.1. Nombre de mots lus

Pour rappel, à T1 et T2, les élèves devaient traduire en français 12 mots arabes, d'abord lus puis dictés oralement. Le nombre de mots lus (correctement traduits depuis la forme écrite) divisé par le nombre de mots connus (correctement traduits depuis l'oral) était un indicateur du niveau de lecture corrigé pour le niveau en vocabulaire. Les proportions de mots traduits en lecture sont rapportées dans le tableau suivant.

	T1	T2
MAN	27.93% (30.91)	36.40% (37.81)
CLA	28.93% (33.42)	29.01% (38.13)

Tableau 22 : Pourcentages de mots lus en fonction du moment et du groupe. La valeur entre parenthèse correspond à l'écart-type.

L'analyse du pourcentage de mots lus n'a pas mis en évidence d'effet du groupe ($\beta=0.18$, $SE=0.53$, $z=0.26$, $p=0.790$), ni du moment ($\beta=0.18$, $SE=0.51$, $z=0.36$, $p=0.72$). Il n'y avait pas d'interaction entre le moment et le groupe ($\beta=0.53$, $SE=1.03$, $z=0.52$, $p=0.604$).

2.2.8.2. Pourcentage d'élèves lisant au moins un mot

Comme la tâche était difficile pour les élèves, nous avons également analysé la proportion des élèves qui étaient capables de traduire au moins 1 mot dans chaque groupe. Les pourcentages d'élèves sont rapportés dans le tableau 23 et la figure 46. Seule la moitié des élèves arrivait à lire au moins 1 mot et, en moyenne, ces élèves arrivaient à lire environ la moitié des mots qu'ils connaissent (55%, min=11.11%, max=100%).

	T1	T2
MAN	51,61%	64,29%
CLA	56,25%	50%

Tableau 23 : Pourcentage d'élèves arrivant à lire au moins un mot en fonction du moment et du groupe.

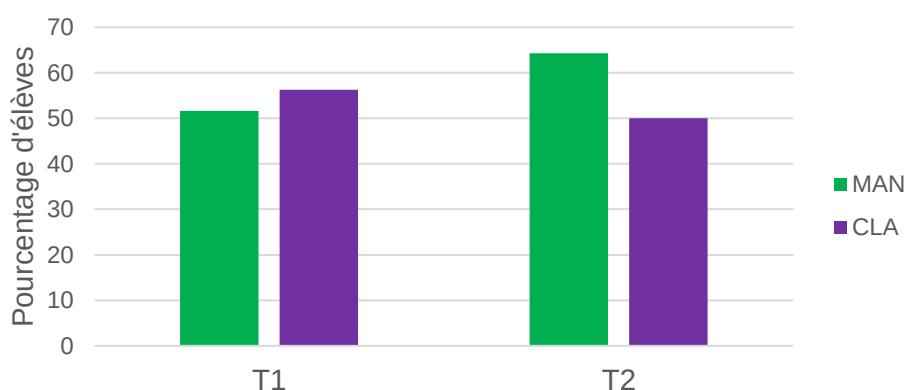


Figure 46 : Pourcentage d'élèves lisant un mot ou plus en fonction du moment et du groupe.

L'analyse statistique n'a pas révélé de différence significative entre les deux groupes ($\beta=0.97$, $SE=1.88$, $z=0.52$, $p=0.605$), ni entre les deux moments de test ($\beta=0.76$, $SE=0.96$,

$z=0.79$, $p=0.428$). L'interaction entre le groupe et le moment n'était pas non plus significative ($\beta=3.24$, $SE=2.19$, $z=1.48$, $p=0.140$).

Résumé :

La capacité à lire des mots était en général faible, n'évoluait pas entre T1 et T2 et ne dépendait pas du mode d'apprentissage.

2.2.9. Dictée de mots

Pour ce test, 6 mots arabes étaient dictés par l'enseignant, l'un après l'autre, et les élèves devaient les écrire, en arabe au fur et à mesure sur une feuille de papier. Ce test a été réalisé à T2 et teste donc l'association phono-graphémique.

Les résultats à ce test sont assez faibles : aucun élève n'a réussi à écrire correctement ou de façon phonologiquement correcte, la totalité des 6 mots. Dans les tentatives d'écriture des mots, 36.4% des élèves du groupe MAN et 33.3% des élèves du groupe CLA ont réussi à écrire au moins 1 mot correctement. L'analyse statistique sur le nombre d'élèves ayant réussi à écrire correctement un mot sous dictée n'a pas montré d'effet du groupe ($\beta= 0.41$, $SE=0.90$, $z=0.46$, $p=0.648$).

Chez les élèves produisant au moins une lettre (soit 18 élèves pour le groupe MAN et 16 pour le groupe CLA), nous avons également compté le nombre de lettres correctement écrites sur l'ensemble des 6 mots (pouvant aller de 1 à 23 lettres). Le nombre de lettres était bas dans les deux groupes : 8.41/7.34 lettres en moyenne pour le groupe MAN et 7.43/7.99 pour le groupe CLA. L'analyse statistique a montré que le nombre de lettres correctes produites ne dépendait pas du groupe ($\beta=0.22$, $SE=0.45$, $z=0.47$, $p=0.639$). /($\beta=0.00$, $SE=0.18$, $z=0.01$, $p=0.99$).

En résumé :

L'écriture sous dictée est une tâche difficile pour les élèves, même en milieu d'année de 5^{ème}. Le mode d'écriture adopté en 6^{ème} ne semble pas influencer la capacité à écrire sous dictée en 5^{ème}.

Résumé des résultats

	Test (variable)	T0-T1	T1	T1-T2	T2
Processus moteurs	Copie-man facile (durée)	MAN ↗ ↗ CLA ↗	MAN>CLA (ns)	MAN = CLA ↗	=
	Copie-man facile (BR)	.	=	=	=
	Copie-cla facile (BR)	.	CLA>MAN	.	.
Forme visuelle des lettres	NB-lettre (NB lettres)	MAN ↗ CLA ↗ ↗	=	MAN ↗ CLA ↘	=
	NB-lettre (NB miroir)	MAN ↘ CLA ↗	=	=	=
	NB-lettre (élève miroir)	MAN ↘ CLA ↗	=	=	=
	Miroir-lettre (BR)	.	=	MAN ↗ CLA ↗	=
Correspondance allographique	Copie-man difficile (BR)	.	MAN>CLA	=	MAN>CLA
	Copie-cla difficile (BR)	.	=	.	.
	Allo-lettre (BR)	MAN ↗ CLA ↗	=	MAN = CLA ↘ ↘	=
Association grapho-phonémique	Phono-lettre (BR)	.	=	MAN ↗ CLA ↘ ↘	=
	Lecture-mot (BR)	.	=	=	=
	Lecture-mot (élève)	.	=	=	=
	Dictée-mot (BR)	.	.	.	=
Sens du système graphique	Sens lecture (élève)	.	=	=	=
	NB-lettre - sens (élève)	.	=	T0/T2 : MAN ↗ CLA ↘	=

Tableau 24 : Résumé des résultats. BR : analyse sur les Bonnes Réponses ; NB : analyse sur le nombre ; élève = analyse par élève ; . : le test n'a pas été réalisé ; ↗ : augmentation ; ↗↗ = augmentation plus forte ; = à T1 ou T2 : pas de différence entre les groupe ; = à T1-T0 ou T2-T1 : pas de différence entre les deux sessions de test.

3. Discussion

Le mode d'écriture pratiqué dans les premières étapes d'apprentissage d'un nouveau système graphique a-t-il un impact sur l'apprentissage des lettres ? Les résultats obtenus dans notre étude montrent que c'est le cas, et nous allons discuter les effets de chacun des modes d'apprentissage sur les diverses connaissances testées.

Une dizaine d'études ont déjà comparé l'écriture à la main et au clavier pendant l'apprentissage de lettres latines chez des jeunes enfants et de nouvelles formes graphiques (caractères étrangers ou pseudo-lettres) chez des adultes (Cao et coll., 2013; Guan et coll., 2011; Kiefer et coll., 2015 ; Longcamp et coll., 2005 ; Mayer et coll., 2020 ; Wiley & Rapp, 2021). Cependant ces études ont été réalisées sur une courte période de temps et avec des apprentissages limités, bien loin des conditions réelles d'apprentissage d'un système graphique. Dans notre étude, les élèves étaient en contexte écologique d'apprentissage des lettres dans le cadre d'une langue. Ils n'étaient pas en situation expérimentale où la présentation visuelle d'une durée fixe serait associée à l'audition simultanée et à la copie/frappe de la lettre avant de passer à la lettre suivante (voir par exemple Wiley et Rapp, 2021). Les entraînements étaient réalisés en classe entière et les lettres étaient écrites le plus souvent au sein de mots, après avoir été travaillées à l'oral. Même dans ces conditions, les réponses à plusieurs des tests étaient influencées par le mode d'écriture appris.

Globalement, les résultats montrent un avantage de l'apprentissage manuscrit dans plusieurs tests, qui tend à confirmer les résultats des études précédentes. En effet, les performances à T1, et l'évolution des performances entre les différents moments de test, suggèrent un avantage de l'apprentissage manuscrit pour la connaissance des allographes et le traitement de l'orientation des lettres. Toutefois, l'apprentissage au clavier a aussi semblé favoriser les performances dans certains tests, et en particulier dans le rappel spontané de lettres à T1. Par ailleurs, l'analyse à T2 a montré que les performances du groupe MAN tendaient à moins se détériorer, ou à s'améliorer davantage que celles du groupe CLA. Enfin, dans les tests qui visaient les compétences d'association entre les

lettres et les sons correspondants, les performances des deux groupes ne se sont pas différenciées à T1 mais dans la durée (T2), le groupe MAN est meilleur.

3.1. Description des processus en jeu dans les apprentissages manuscrit et clavier

Les apprentissages se sont déroulés de manière hebdomadaire pendant plusieurs mois, et les participants ont donc pu se créer des représentations sensori-motrices des lettres à la fois à la main et au clavier. L'évolution des apprentissages dans les deux modes d'écriture est représentée sur la figure 47. En répétant la copie manuscrite de lettres, les participants se créent une représentation propre à chaque allographe, qui va permettre d'automatiser les processus d'écriture. En répétant la copie au clavier, les élèves ne vont pas associer de composantes sensori-motrices liées à la forme spatiale de la lettre. Cependant, avec un apprentissage suffisant, ce qui n'était surement pas le cas dans les études précédentes, les élèves ont pu se créer une représentation spécifiant pour chaque lettre (peu importe l'allographe) une position sur le clavier (Logan, 2018; Rumelhart & Norman, 1982). Dans les deux cas, l'apprentissage va permettre l'émergence de représentations de la lettre, visuelle, abstraite mais la représentation sensori-motrice semble réservée à l'écriture manuscrite.

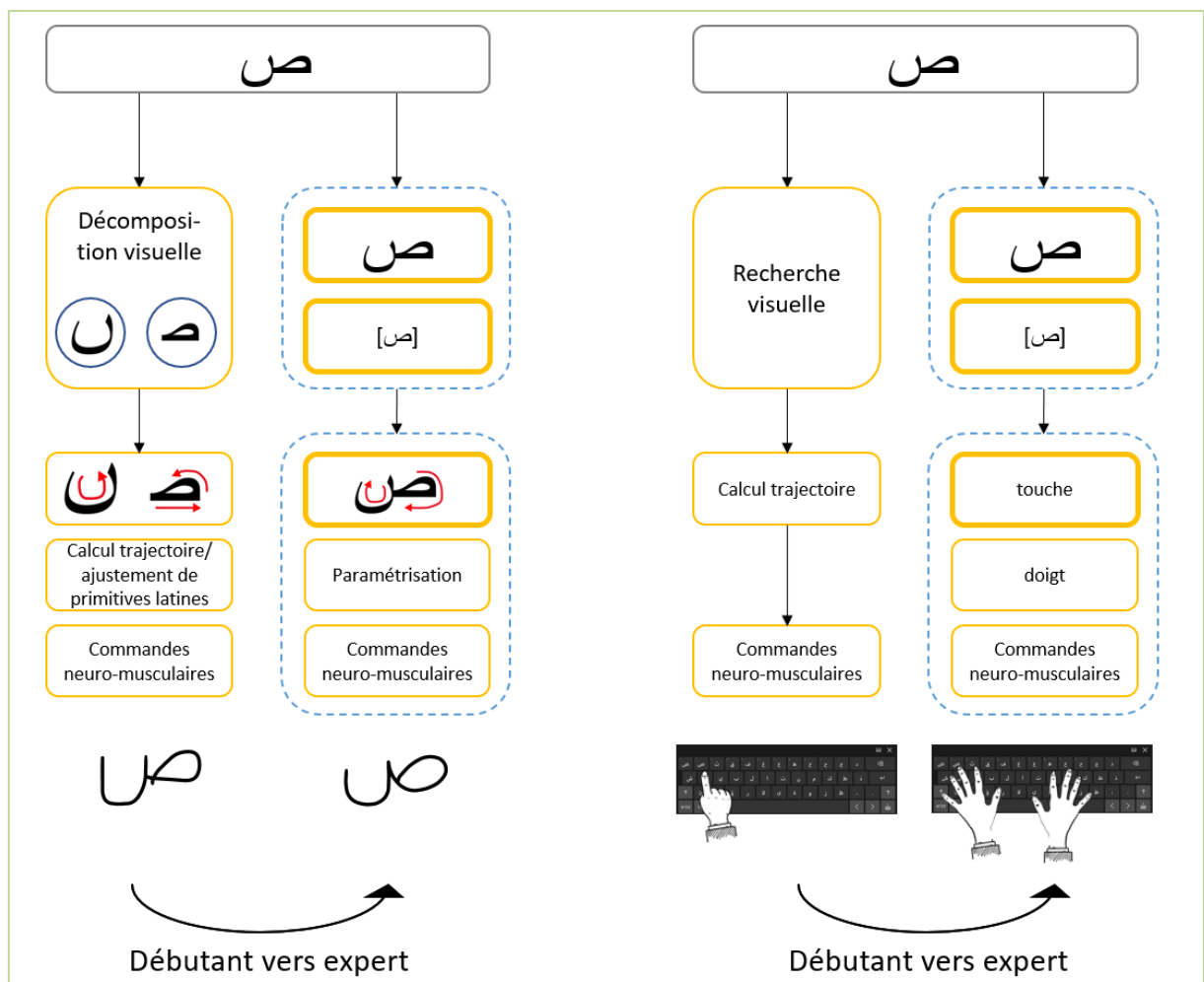


Figure 47 : Traitements visuels et moteurs impliqués dans une tâche de copie de la lettre arabe 'sâd' chez l'apprenant et l'expert, à la main (gauche) et au clavier (droite). Les cadres en gras représentent les représentations de la lettre acquises par l'apprentissage : représentation visuelle, de l'identité abstraite ([ص]), patron moteur pour l'écriture manuscrite et la touche pour l'écriture au clavier. Dans cet exemple, la lettre est isolée, mais lorsqu'elle sera incluse dans un mot, elle pourra changer de forme.

Il est important de noter que la majorité des sessions d'apprentissage se sont déroulées en utilisant des mots et non des lettres isolées. Nous n'étions donc pas dans cette situation « épurée » dans laquelle une lettre isolée est copiée. Cela induit des processus supplémentaires dans les deux modalités d'apprentissage.

D'abord, au clavier, dans la majorité des cas, la forme visuelle de la lettre à l'intérieur d'un mot (forme liée) ne correspond pas à la forme présentée sur la touche (forme isolée). Pour pouvoir retrouver la lettre sur le clavier, il est donc nécessaire de visualiser, de façon explicite, avec l'aide de l'enseignant ou en rappel mental, la forme isolée de la lettre à

produire. Le rappel de la forme isolée peut aussi être aidé par l'observation des lettres sur le clavier et/ou par la similitude entre les lettres liées/isolées. Cette étape de visualisation de la forme isolée est importante au début de l'apprentissage. Lorsque la frappe tend à s'automatiser, les participants peuvent retrouver la touche correcte, directement depuis l'identité abstraite (Purcell et coll., 2011a ; Rapp et Fisher-Baume, 2015). **L'apprentissage au clavier demande donc une bonne connaissance des allographes.**

Pour l'apprentissage manuscrit, en début d'apprentissage la copie pouvait se faire en décomposant le mot en segments visuels et en traçant ces segments les uns après les autres. Avec l'évolution de la pratique, ces segments deviennent de plus en plus grands (Grossberg et Paine 2000) et sont regroupés dans des séquences de plus en plus longues (Gobet, et coll., 2016). Mais il est possible que les séquences ainsi créées ne correspondent pas toujours à une décomposition en lettres, contrairement à ce qui se produit au clavier. Pour la copie manuscrite, les élèves peuvent se contenter de 'dessiner' le mot sans effectuer la moindre opération cognitive de décomposition en lettres. Au cours des discussions que nous avons eues avec les enseignants d'arabe, ceux-ci ont souvent exprimé cette opinion selon laquelle les élèves se contentent de dessiner quand ils écrivent. **Pour résumer, l'apprentissage manuscrit ne favorise pas spécifiquement la décomposition des mots en lettres.**

3.2. Effet des apprentissages sur la production d'écriture

La représentation motrice des caractères était au cœur de cette étude, et nous avons cherché à comparer l'effet des deux pratiques sensori-motrices de l'écriture sur le test de copie de mots, dans la condition simple qui n'impliquait pas de changement allographique. Après 6 mois d'apprentissage, la copie de mot réalisée par tous les élèves à la main et au clavier devrait montrer un effet de la concordance entre l'entraînement et le test, ce qui est effectivement le cas puisque les élèves du groupe MAN ont davantage amélioré leur performance que les élèves du groupe CLA en écriture manuscrite, alors que l'inverse est observé en écriture au clavier.

3.2.1. Une amélioration de l'écriture manuscrite pour les deux groupes, mais plus importante pour le groupe MAN

Dans le test de copie manuscrite de mots en condition simple, les élèves du groupe MAN ont davantage amélioré leur vitesse d'écriture que les élèves du groupe CLA après l'apprentissage. Cette amélioration suggère que ces élèves ont appris et mémorisé un patron moteur pour écrire chaque lettre (Grossberg and Paine (2000) ; Palmis, et coll., 2017 ; voir figure 47).

Nous avons aussi observé que le groupe CLA améliorait également, bien que dans une moindre mesure, sa vitesse d'écriture alors que l'écriture de l'arabe n'avait pas été pratiquée. Deux interprétations peuvent être avancées : D'abord, la segmentation du mot en lettres et la décomposition des lettres en traits pourrait s'améliorer car les élèves ont appris la forme visuelle des lettres. En copie, passer par la forme visuelle mémorisée d'une lettre serait donc plus rapide que de faire du « dessin » pur. Alternativement, les élèves ont peut-être amélioré leur graphomotricité de manière générale. Rappelons que ces élèves ne maîtrisent pas très bien l'écriture du français à l'entrée au collège. Or, pendant les 6 premiers mois de collège, ils ont été amenés à beaucoup écrire en français, ce qui, en plus d'avoir un effet sur la maturation développementale du système moteur (Chartrel & Vinter, 2004; Palmis et coll., 2017), a probablement eu aussi des effets sur leurs compétences graphomotrices.

L'analyse fine des directions de production des traits au sein des lettres pourrait permettre de voir si les élèves des deux groupes forment les lettres de manière différente. Nous pourrions faire l'hypothèse que les élèves du groupe clavier sont à un stade plus précoce d'apprentissage des lettres à la main et donc utilisent pendant le test des « primitives » ou des règles empruntées à leur système maternel, l'alphabet latin. En effet, les élèves ne sont pas débutants en termes de graphomotricité : ils ont déjà une expérience de plusieurs années en écriture du français. Pour écrire les lettres arabes, ils pourraient donc 'recycler' les procédures motrices dont ils disposent pour tracer les lettres latines, décrites dans le cadre de la 'grammaire de l'action' (Goodnow & Levine,

1973 ; voir figure 47). Ces procédures, décrites pour l'alphabet latin, ne sont pas totalement adaptées à l'écriture arabe qui se déroule de droite à gauche. Comme nous le verrons dans la seconde partie expérimentale de ce manuscrit, la direction des traits droits horizontaux et des traits courbes diffère entre les deux alphabets chez des adultes experts bigraphes arabe/français. L'apprentissage manuscrit doit favoriser l'acquisition de ces spécificités graphomotrices propres à l'arabe.

Dans le groupe MAN, la vitesse d'écriture restait stable entre T1 et T2. Cela peut laisser penser à un effet plafond, suggérant que l'acquisition des patrons moteurs d'un second système graphique se fait plus rapidement que l'acquisition du premier, et que 6 mois sont suffisants pour automatiser les patrons moteurs des lettres. Cependant la longue durée d'écriture de chaque lettre (2,3 secondes en moyenne) suggère que les élèves sont capables d'accélérer encore leur écriture. Une autre possibilité peut venir de la différence de support utilisé : entre T0 et T1, les élèves ont écrit sur une tablette et ont amélioré leur performance. Entre T1 et T2 les élèves ont écrit sur le cahier et ont été testés sur une tablette. Des études ont montré que le support glissant de la tablette modifiait notamment la friction et donc la vitesse de l'écriture (Alamargot & Morin, 2015; Gerth et coll., 2016; Guilbert et coll., 2019). Il est donc possible que la différence de support entre l'entraînement et le test ait ralenti l'écriture du groupe MAN à T2.

Enfin, il faut noter que les élèves du groupe CLA ont progressé en écriture manuscrite entre T1 et T2. Cette progression est bien sûr attendue car ces élèves se sont entraînés à la main dans cette période. Mais elle reste néanmoins intéressante car la progression des élèves CLA à T2 leur a permis d'atteindre des performances équivalentes à celles des élèves MAN. Il serait intéressant de voir si, le problème de conflit de support étant contrôlé, l'absence de différence entre les groupes persiste: en effet, alors que certains pédagogues préconisent de retarder l'apprentissage de l'écriture manuscrite et de commencer au clavier (Trageton, 2010), on ne sait pas quels seraient les effets possibles d'un délai dans le début de l'apprentissage sur la maîtrise de l'écriture manuscrite.

3.2.2. Performances en écriture au clavier après l'apprentissage

Dans la tâche de copie de mots en condition simple au clavier, les élèves CLA faisaient moins d'erreurs de frappe que les élèves MAN. Ce résultat indique naturellement que les élèves ayant utilisé le clavier pendant les sessions d'entraînement le connaissent mieux. En ce qui concerne les connaissances liées à la position des touches qu'auraient pu se créer le groupe clavier, il aurait fallu analyser les temps de production des frappes, qui devrait être plus courts pour les élèves du groupe clavier. Cependant le faible nombre d'essais par élèves (5 dans chaque condition) et de nombreuses erreurs de manipulation liées à l'application utilisée nous a empêché d'utiliser les temps de frappe, trop bruités.

3.3. Représentation de la forme visuelle et de l'association allographique

3.3.1. Un avantage temporaire du clavier dans l'apprentissage des lettres arabes

Après 6 mois d'écriture au clavier, les élèves de ce groupe étaient capables d'écrire les lettres qu'ils connaissaient à la main, en rappel libre donc sans modèle visuel. Puisqu'ils n'ont pas appris à les écrire et qu'ils ne possèdent pas les patrons moteurs, pour effectuer cette tâche ils ont dû rappeler mentalement la forme visuelle des lettres et la décomposer en traits élémentaires (Bara & Bonneton-Botté, 2018 ; Rapp & Caramazza, 1997). Ce test de production libre permet donc d'évaluer la connaissance de la forme visuelle de ces élèves. S'ils étaient des scripteurs experts, écrire les lettres pourrait se faire directement grâce au patron moteur mémorisé, sans obligatoirement passer par la représentation visuelle des lettres (Menichelli et coll., 2008 ; Rapp & Caramazza, 1997 ; van Galen, 1991). En ce qui concerne le groupe manuscrit, on devait se trouver dans une situation intermédiaire, où ils activaient les patrons moteurs des lettres qu'ils connaissaient et la représentation visuelle des autres.

Un résultat important de notre étude est que les élèves du groupe CLA ont progressé davantage dans la tâche de rappel libre entre T0 et T1 que les élèves du groupe MAN, et ce malgré la différence de méthode d'écriture entre les sessions d'entraînements et le test. Les élèves CLA ne possédant pas de représentation sensori-motrice manuscrite des lettres, ce résultat contredit plutôt les études précédentes qui avaient conclu à un avantage de la motricité spécifique à l'écriture manuscrite dans la mémorisation de la forme visuelle des lettres (Cao et coll., 2013; Longcamp et coll., 2005, 2006, p. 2006, 2008; Mayer et coll., 2020). Kiefer et coll. (2015) ont utilisé cette même tâche et ont observé un effet opposé, mais leur étude était réalisée chez des enfants de 4 à 6 ans qui ne maîtrisaient donc pas bien la graphomotricité. Dans notre étude, les élèves étaient plus âgés (11 ans) et avaient déjà une maîtrise de la graphomotricité du français. Ils étaient donc moins en difficulté pour la partie motrice de la tâche d'écriture des caractères arabes, même s'ils ne les avaient pas écrits pendant la phase d'apprentissage.

L'avantage de l'apprentissage au clavier dans cette tâche peut avoir plusieurs origines : d'abord, il est possible que l'écriture sur tablette ait été plus couteuse que si elle avait été faite sur papier. Comme nous l'avons déjà dit, écrire à la main sur tablettes perturberait les retours sensoriels à cause de la surface d'écriture glissante (Alamargot & Morin, 2015; Gerth et coll., 2016; Guilbert et coll., 2019). Il faut remarquer que certains élèves ont fait état d'une difficulté liée au support glissant de la tablette. La plus forte amélioration du groupe CLA pourrait donc être la conséquence d'une difficulté à apprendre à écrire à la main sur une tablette. Une étude récente de Mayer et coll. (2020) va dans ce sens : les auteurs ont montré que l'écriture manuscrite sur papier, mais pas sur tablette, avantagait la connaissance de la forme visuelle des lettres par rapport au clavier. Une autre explication tient aux spécificités graphomotrices de l'arabe : Il est possible que dans notre étude, les élèves apprenant à la main aient été perturbés par le « réapprentissage » de primitives motrices, opposées à leurs primitives maternelles, nécessaires pour s'adapter au sens de progression de l'arabe (Figure 47, gauche).

Dans les deux cas, la difficulté à écrire de façon manuscrite sur tablette des lettres ayant des caractéristiques graphomotrices nouvelles peut impacter négativement

l'apprentissage, dans une approche dite de charge cognitive. En effet, selon certains auteurs, nous possédons une quantité de ressources attentionnelles/de mémoire de travail limitée et cette quantité va être répartie entre les différents traitements et le stockage à court terme des représentations pendant les traitements (Lavie & Dalton, 2014 ; Olive & Piolat, 2005 ; Sweller et coll., 2011). La copie de lettres étant très coûteuse en début d'apprentissage (Chartrel & Vinter, 2004 ; Pleau & Lavoie, 2016 ; Zesiger et coll., 2000), et particulièrement dans le cas de l'arabe pour un élève français, le décharger de certaines contraintes à l'aide du clavier lui permettrait de pouvoir répartir différemment ces ressources et d'allouer les ressources prises par l'activité motrice de bas niveau aux traitements permettant l'acquisition des représentations des lettres. Cette interprétation ne va pas forcément dans le sens d'un avantage de l'écriture manuscrite avancé par d'autres auteurs dans une approche d'apprentissage multisensoriel (Bara et coll., 2004, 2007; Bara & Bonneton-Botté, 2018) : en tous cas, il est possible que le bénéfice de l'apprentissage manuscrit disparaisse quand les conditions d'entraînement deviennent trop coûteuses au plan cognitif.

Les spécificités de l'arabe pourraient aussi induire un avantage de la pratique sur clavier, au moins au début de l'apprentissage. L'écriture de mots sur clavier oblige de passer par la forme visuelle de chaque lettre pour pouvoir la trouver sur le clavier. Cette spécificité de l'entraînement au clavier a pu permettre au groupe CLA de mieux différencier chacune des lettres au sein des mots que le groupe MAN. Le clavier induit également indirectement un temps d'exposition visuelle aux lettres plus important : Pendant les apprentissages, les élèves du groupe CLA étaient confrontés en permanence à l'ensemble des lettres de l'alphabet arabe, sous leur forme isolée, sur le clavier virtuel de la tablette. Un apprentissage implicite, par répétition de l'exposition visuelle, a pu se produire, notamment pour les lettres isolées qui n'étaient pas souvent écrites pendant les cours relativement aux formes liées. Ceci, combiné à la durée des apprentissages qui était beaucoup plus longue que dans les études précédentes, a pu favoriser le groupe CLA.

Pour résumer, on peut penser que les élèves ont mieux appris les lettres au clavier à cause de la spécificité physique de l'écriture sur tablette, le coût lié à l'aspect moteur de la

bigraphie arabe/française (le sens d'écriture) les particularités de l'arabe au clavier et la surexposition aux lettres.

Si le clavier a présenté un avantage à T1, cet avantage ne s'est pas maintenu à T2, six mois après que les élèves aient arrêté l'écriture au clavier pour passer à l'écriture manuscrite. En effet, à T2 le nombre de lettres produites par le groupe MAN a augmenté alors qu'il a diminué pour le groupe CLA. Ce résultat montre qu'un apprentissage initial par le clavier est moins efficace à long terme qu'un apprentissage manuscrit. Comme dans le groupe CLA les élèves ont changé de modalité d'apprentissage après 6 mois, il est possible que les connaissances acquises grâce au clavier ne transfèrent pas à l'écriture manuscrite. Par exemple, selon certains auteurs, une variabilité dans les formes visuelles produites en écriture manuscrite permettrait un meilleur apprentissage de la forme visuelle des lettres, en facilitant l'extraction des composantes visuelles caractéristiques des lettres (Li & James, 2016). Il est possible que ce processus mette plus de temps à se développer. Comme dans le groupe CLA les élèves ont changé de modalité d'apprentissage après 6 mois, il est possible que les connaissances acquises par le clavier ne transfèrent pas à l'écriture manuscrite. Par ailleurs, l'apprentissage manuscrit dans les conditions de notre expérience, bien que plus coûteux que l'apprentissage au clavier au départ, pourrait permettre de générer des représentations des lettres plus stables à long terme (Longcamp et coll., 2005 ; 2006).

3.3.2. Un avantage de l'apprentissage manuscrit pour le traitement de l'orientation des lettres, limité à la production spontanée

Plusieurs études ont montré que des adultes faisaient moins de confusion en miroir dans une tâche de reconnaissance visuelle quand ils avaient préalablement appris à écrire les caractères à la main que lorsqu'ils les avaient appris au clavier (Longcamp et coll., 2006, 2008 ; Seyll et coll., 2020). Les résultats de notre expérience ne confirment pas complètement ces données : en effet après 6 mois, les élèves répondaient effectivement

au-dessus du hasard dans la tâche perceptive, mais il n'y avait pas de différence significative entre les groupes. Les modalités d'apprentissage se différenciaient par contre dans la tâche de production.

En ce qui concerne la tâche perceptive, l'avantage du groupe clavier dans le rappel des lettres isolées à T1, a pu compenser l'avantage de l'écriture manuscrite pour la reconnaissance de l'orientation observé par Longcamp et coll. (2006, 2008) et Seyll et coll. (2020) dans des conditions plus contrôlées. Une autre possibilité est que la tâche était trop difficile pour les élèves avec les lettres arabes, ce qui a pu masquer des différences fines entre les groupes. En effet, les scores en post-tests (62% de bonnes réponses) montrent que les élèves faisaient encore de nombreuses confusions. Une bonne connaissance de l'orientation est probablement difficile à acquérir en arabe pour nos participants, qui devaient en particulier apprendre à la fois l'information d'orientation des lettres et un sens d'écriture opposé à celui qu'ils maîtrisaient.

La connaissance de l'orientation était aussi testée dans le test de production libre des lettres. Dans ce cas par contre, les élèves MAN ont progressé entre T0 et T1 tandis que les performances des élèves CLA ont diminué. Au début de l'apprentissage de l'écriture, les lettres produites en miroir sont courantes, chez les enfants (Fischer & Tazouti, 2012 ; Schott, 2007) mais aussi chez des adultes apprenant un nouveau système graphique (Wiley et Rapp, 2021).

L'augmentation du nombre de lettre produites en miroir dans le groupe CLA pourrait donc être expliquée par l'absence de représentation sensori-motrice des caractères chez ces élèves. L'apprentissage au clavier génèrerait donc une représentation visuospatiale moins précise des lettres, voire impacterait négativement des représentations déjà existantes. Chez 296 enfants de grande section de maternelle (5-6 ans), Fisher et Tazouti (2012) ont montré que, parmi les 8 lettres que les enfants devaient écrire de mémoire, les 3 lettres qui ne « regardaient » pas vers la droite (S, Z et J) contenaient à elle seule 64% des erreurs en miroir produites (par rapport à B R E L et C). Selon les auteurs, lorsque l'enfant ne connaît pas l'orientation de la lettre il utilise des indices moteurs d'expériences

antérieures (Fisher et Tazouti, 2012). Dans notre cas, l'utilisation de primitive latine par les élèves de groupe CLA pourrait favoriser la production en miroir des lettres arabes. Cette interprétation est en faveur de l'hypothèse d'une interaction entre les représentations visuelle et motrice dans le traitement de l'orientation des lettres (Longcamp et coll., 2006, 2008 ; Wong et coll., 2018). Cependant les groupes n'ayant pas été appariés sur le nombre de lettres en miroir au début de l'expérimentation, il serait intéressant de confirmer ces résultats.

La reconnaissance de l'orientation des lettres s'est améliorée chez tous les élèves après 6 mois de pratique supplémentaire. Comme c'était déjà le cas à T1, les deux groupes ne se différencient pas à T2. En production par contre, après 6 mois supplémentaires d'apprentissage manuscrit, les élèves du groupe CLA continuaient à tracer davantage de lettres en miroir. Ce résultat est étonnant et suggère que le retour à la main ne permet pas au groupe ayant appris initialement au clavier de corriger l'orientation des lettres. Il est donc possible que l'apprentissage initial au clavier impacte durablement la représentation de l'orientation des lettres.

3.3.3. L'Association allographique favorisée par l'apprentissage manuscrit

L'association allographique est une dimension très importante du système graphique arabe car les allographes varient en fonction de la position dans le mot. Selon les modèles actuels de la perception visuelle, les différents allographes d'une lettre sont reliés par le biais d'une représentation indépendante de la forme visuelle de la lettre, codant son identité (Rothlein & Rapp, 2014; Schubert & McCloskey, 2013). En production également, tous les allographes sont associés à une identité abstraite (ou « graphème » ; Bonin et coll., 2001 ; Ellis, 1982 ; Rapp & Fischer-Baum, 2015). Ce sont les tâches de copie difficile et de correspondance entre forme liée dans un mot et forme isolée qui nous ont permis d'évaluer si les élèves avaient bien intégré les différents allographes des lettres. Tous les effets obtenus dans cette tâche témoignent d'un avantage de l'apprentissage manuscrit pour l'acquisition de cette connaissance : en effet, 1. les élèves du groupe MAN étaient plus

performants que les élèves du groupe CLA en condition manuscrite difficile, 2. ils n'étaient pas défavorisés par rapport aux élèves CLA dans la condition difficile au clavier, et - ils maintenaient leurs performances d'association explicite des allographes à T2 alors que la performance des élèves CLA se dégradait. C'est étonnant car, comme nous l'avons souligné, c'est plutôt l'apprentissage au clavier qui favorise cette association explicitement. On peut donc penser que l'apprentissage manuscrit promeut une activation efficace de l'association entre les différents allographes, que ce soit en perception ou en production.

Parmi les études comparant l'apprentissage manuscrit et au clavier, seuls Wiley et Rapp. (2021) se sont intéressés à la dimension 'association allographique'. Ces auteurs ont demandé à des participants de juger la similarité visuelle entre les lettres arabes nouvellement apprises présentées par paire. Ils ont remarqué que les temps de réponse étaient plus longs lorsque les deux allographes correspondaient à une même lettre, pour le groupe manuscrit mais pas pour le groupe clavier. Selon les auteurs cela suggère une représentation plus stable de l'identité abstraite des lettres. La représentation abstraite des lettres serait donc influencée par l'expérience d'écriture. Cela démontre que l'écriture manuscrite favorise un apprentissage multidimensionnel (Wiley et Rapp, 2021). Nos résultats sont en accord avec cette interprétation.

La plus grande difficulté du groupe CLA à faire la correspondance allographique pourrait aussi découler d'une représentation visuelle moins précise des allographes liés des lettres. En effet, si l'aspect bénéfique de l'apprentissage au clavier vient de la présentation continue des lettres sur le clavier, cet avantage n'est pas présent pour les formes liées, que les élèves n'ont pu apprendre que lorsque le retour était donné sur l'écran. La représentation des formes visuelles liées serait donc moins détaillée, se dégraderait plus rapidement et ne permettrait pas une copie correcte (Wong et coll., 2018).

La tâche d'écriture difficile au clavier permettait d'étudier la correspondance allographique sans nécessité de produire les lettres de façon manuscrite. Cette tâche a été

aussi complexe pour les deux groupes, et n'a pas révélé de différence. Cependant, si l'on considère que le groupe manuscrit faisait plus d'erreurs en copie simple au clavier, en condition difficile l'absence de différence entre les groupes suggère que le groupe manuscrit a peut-être compensé la moins bonne connaissance du clavier par une meilleure connaissance de l'association allographique.

En résumé, on peut penser qu'après les 6 mois d'apprentissage différencié, les élèves du groupe CLA ont une meilleure représentation visuelle des allographes isolés, mais probablement une moins bonne représentation visuelle des allographes liés et des règles d'utilisation des allographes.

Nous n'avons pas trouvé d'évolution entre T1 et T2 dans la tâche de production écrite : le groupe ayant commencé l'apprentissage à la main écrivait toujours davantage de mots correctement. Pour le test de reconnaissance des allographes, à T2, la tâche impliquait de mémoriser en mémoire à court terme l'ensemble des lettres composant le mot présenté sous forme liée. La performance de l'ensemble des élèves a été affectée par cette augmentation de difficulté de la tâche (quantité de matériel à retenir), mais le groupe MAN qui a commencé par l'écriture manuscrite, a eu une performance moins dégradée que le groupe CLA qui avait commencé au clavier. Ce résultat est important car il indique que l'apprentissage initial au clavier, même s'il est suivi d'un apprentissage manuscrit, ne permet pas d'acquérir aussi bien la correspondance allographique qu'un apprentissage manuscrit. Comme nous l'avons vu, l'apprentissage au clavier a nécessité la segmentation de chaque mot en lettres, ce qui n'était pas le cas dans l'écriture manuscrite. Après plus d'un an d'écriture à la main, le groupe MAN a pu produire les mots d'un trait, ou du moins enchaîner plusieurs lettres et ainsi développer d'avantage sa mémoire orthographique.

Plus généralement, ce résultat confirme que les connaissances sur les lettres acquises par écriture manuscrite se maintiennent mieux dans le temps que les connaissances acquises au clavier (Longcamp et coll., 2005 ; 2006 ; 2008).

3.4. L'association avec les informations phonologiques est plus stable à long terme avec un apprentissage manuscrit

Après 6 mois (T1), les élèves connaissaient l'association phonologique pour 72% des lettres testées et il n'y avait pas de différence entre les deux groupes. Ce résultat suggère que l'influence de la motricité pendant l'apprentissage est restreint à l'aspect visuel et moteur des lettres. Il n'est pas en accord avec plusieurs études qui ont montré un avantage de la motricité dans l'apprentissage de la relation grapho-phonologique (Bara et coll., 2004, 2007 ; Bara & Gentaz, 2011 ; Wiley & Rapp, 2021). Par contre, même si l'association grapho-phonologique n'a pas évolué entre T1 et T2, les performances du groupe MAN ont en fait augmenté tandis que celles du groupe CLA ont diminué. Ce résultat se rapproche de celui observé sur le rappel libre de lettres, où les élèves qui ont développé certaines compétences en utilisant le clavier ne les conservent pas en écrivant à la main. Le rôle de la composante sensori-motrice pour la mémorisation à long terme des caractères serait donc plus global que la forme visuelle et comprendrait également la correspondance grapho-phonologique. Dans ce sens, la supériorité de l'apprentissage manuscrit dans notre étude ne se manifeste pas immédiatement mais est présente à plus long terme. Cette différence de temporalité par rapport aux études précédentes qui avaient testé ce type d'effet (Bara et coll., 2004, 2007 ; Bara & Gentaz, 2011 ; Wiley & Rapp, 2021). peut être liée aux particularités du système arabe ou aux conditions spécifiques de notre expérimentation.

L'association grapho-phonologique n'étant pas entièrement maîtrisée, la lecture était une tâche très difficile pour les deux groupes et n'a pas révélé de différence entre les groupes. La lecture en arabe est particulièrement difficile car, le décodage ne suffit pas pour lire un mot (étant donné qu'il est écrit sans les voyelles brèves). Des études ont testé la lecture de mots et l'écriture sous dictée après un apprentissage des lettres à la main ou au clavier, en allemand. Les résultats sont variables et aucun consensus n'existe sur une possible contribution du mode d'apprentissage de l'écriture à l'association entre les graphèmes et les sons du langage dans les mots (Kiefer et coll., 2015 ; Mayer et coll., 2020).

Dans les études sur les enfants (Kiefer, et coll. 2015 ; Mayer, et coll. 2020), les scores sont également assez bas. Malgré un entraînement plus long dans notre étude, la tâche était encore trop difficile pour laisser apparaître des différences possibles entre les deux groupes. Cela aurait nécessité une étude plus longue comme prévu initialement avec deux ans d'apprentissage différencié et deux ans de suivi ensuite, après un retour manuscrit pour tous les élèves. Enfin, à T2 comme à T1, le niveau en lecture était encore faible et ne montrait pas de différence entre les deux groupes. Il en est de même pour la tâche de dictée qui a été très difficile pour les élèves, à ce stade de leur apprentissage.

3.5. Un effet limité de la modalité d'apprentissage sur l'acquisition du sens du système graphique

Le test qui visait à évaluer spécifiquement cette compétence en perception n'a pas montré de différences entre les modalités.

L'écriture manuscrite aurait dû favoriser l'acquisition du sens d'écriture car la main se déplace dans le sens de l'écriture. Ecrire au clavier ne nécessite pas de maîtriser la direction d'écriture puisque les mouvements de frappe sont indépendants du sens dans lequel les lettres apparaissent : c'est le logiciel de traitement de texte qui prend cela en charge. Produire spontanément les lettres dans le sens de l'écriture est un indice de l'internalisation de ce sens d'écriture. Dans la tâche de rappel libre des lettres, nous avons observé que le nombre d'élèves agençant les lettres dans le sens correct de l'arabe (de la droite vers la gauche) avait tendance à augmenter dans le groupe manuscrit uniquement. Ce résultat nécessiterait d'être confirmé, car il n'est que marginal et de plus les groupes n'étaient pas appariés sur cette variable au pré-test, c'est un premier indicateur de l'avantage de l'écriture manuscrite dans l'acquisition du sens d'écriture.

3.6. Limites de cette étude sur le terrain

Globalement, notre étude a confirmé un avantage de l'apprentissage manuscrit pour l'acquisition des différentes dimensions des lettres arabes. Cependant, l'apprentissage au clavier était plus efficace pour le rappel libre des lettres à T1, ce qui indique que le clavier pourrait apporter aussi un bénéfice spécifique dans certaines conditions.

Bien sûr, et particulièrement dans le contexte sanitaire qui a été celui de cette thèse, notre étude a de nombreuses limites.

La première vient de l'hétérogénéité des élèves au sein des groupes. En effet, les participants n'étaient pas complètement débutants, et certains étaient déjà bien avancés dans l'apprentissage. L'annexe 9 présente cette variabilité, sous forme de boxplot pour chaque test. L'expérimentation se déroulant en milieu scolaire, les groupes étaient formés par les classes. Le niveau initial a été pris en compte dans les modèles statistiques pour contrôler cet effet. Cependant, la variabilité a pu réduire les possibles différences entre les deux groupes. Cette limite méthodologique est également une des difficultés majeures rapportées par les enseignants d'arabe. Il y a une variabilité dans le niveau des élèves dans tous les cours mais en arabe c'est extrêmement marqué, car certains élèves ont souvent eu des cours avant, dans divers contextes. S'ajoute le niveau à l'oral et les différents dialectes connus par les élèves.

La seconde limite vient de l'arrêt des cours pendant l'expérimentation pour la deuxième promotion. L'effet de l'année, ajouté dans les modèles statistiques en covariable, était significatif pour la quasi-totalité des tests, montrant clairement de moins bons résultats pour la deuxième promotion, et donc un impact très important du confinement sur les apprentissages des élèves. De plus, les élèves de la deuxième promotion n'ont pas écrit pendant 6 mois après le pré-test, ce qui a pu réduire de façon considérable l'impact du mode d'écriture.

Une autre limite vient de la passation des tests en classe entière, qui a pu donner lieu à de moins bons résultats que si les élèves avaient été testés individuellement.

Enfin, nous avons pu observer de nombreux freins à l'utilisation de tablettes numériques pendant les cours, notamment de nombreux problèmes techniques liés au matériel (mises à jour obligatoire nécessaires pour le bon fonctionnement de la tablette, certaines fonctionnalités de l'application ne fonctionnaient pas). Il est apparu que ce ne sont pas des outils destinés au départ à un usage en classe (il y avait beaucoup trop d'options possibles, des messages intempestifs qui apparaissaient) ce qui a perturbé considérablement les élèves et la classe. La présence d'un groupe contrôle papier/stylo aurait pu permettre d'étudier l'impact de l'écriture sur tablette et du numérique plus généralement.

En conclusion

Ces résultats, ouvrent de nombreuses et nouvelles questions et des perspectives intéressantes. La perspective la plus immédiate serait d'utiliser les résultats obtenus aux différents tests afin de créer une situation d'apprentissage dans laquelle l'écriture manuscrite et au clavier seraient combinées afin de potentialiser les apports possibles de chacune pour les apprentissages, et de la comparer avec des situations où seul l'un ou l'autre mode d'écriture sont entraînés.

Partie Expérimentale 2 :

Ecrire les lettres dans deux systèmes graphiques : Corrélats comportementaux et neuronaux chez des bigraphes arabe/français

Publications :

Fabiani, E., Velay, J-L., Younes-Harb, C., Anton, J-L., Nazarian, B., Sein, J., Habib, M., Danna, J., Longcamp, M. *Writing letters in two graphic systems: Behavioral and neural correlates in French/Arabic biculturals*. (en révision).

Fabiani, E., Velay, J-L., C., Anton, J-L., Nazarian, B., Sein, J., Habib, M., Danna, J., Longcamp, M. *Decoding graphic systems in French/Arabic biculturals during handwriting*. (en préparation).

Communication orale :

Fabiani E., Seblani, M., Longcamp, M., Danna, J., Velay, J-L. *Grapho-motor networks in French/Arabic biculturals*. Réunion Mensuelle de Neuroimagerie CERIMED, 25 avril 2019.

Communication affichée :

Fabiani, E., Younes Harb C., Longcamp, M., Palmis, S., Giordano, B., Danna, J., Anton, J-L., Nazarian, B., Sein, J., Habib, M., Velay, J-L. *Brain activations induced by the writing of Latin Arabic characters in French/Arabic biculturals*. Congrès SNL 2020 (Society for the Neurobiology of Language) en ligne, 21-24 octobre 2020.

Introduction

Les bigraphes experts arabe/français sont capables d'écrire dans les deux systèmes graphiques. Les lettres des deux systèmes sont proches du point de vue de la complexité visuelle (Chang, 2017) et sûrement du point de vue de la complexité motrice, même si cela reste à être démontré. Par contre ces lettres se différencient de par le sens d'écriture de leur systèmes respectifs : de droite à gauche en arabe et de gauche à droite en français.

En tant qu'experts, ils connaissent donc les patrons moteurs spécifiques aux différentes lettres, mais également leur forme visuelle, auditive et leur identité abstraite. La mise en jeu des lettres entraîne l'activation cérébrale d'un réseau multimodal, aujourd'hui connu mais principalement étudié chez le monographe utilisant l'alphabet latin. La question de l'universalité de ce réseau, peu importe les langues, a été débattu et notre étude se place dans ce champ de recherche. Nous questionnons particulièrement cette question dans le cadre de l'écriture de deux systèmes graphiques au sens d'écriture opposé.

Pour cela, nous avons tout d'abord analysé l'écriture d'experts bigraphes arabe/français sur tablette graphique, afin de mieux décrire les spécificités de chaque système au plan graphomoteur. Cette expérience comportementale nous a également permis de sélectionner les lettres latines et arabes à utiliser comme stimuli dans l'expérience en IRMf.

Nous avons ensuite réalisé une étude en IRMf chez un groupe d'experts bigraphes arabe/français. Nous avons enregistré l'activité BOLD pendant une tâche de copie de lettres isolées arabes et latines. Le but de cette étude était de comprendre si les deux systèmes étaient codés différemment au plan cérébral.

Trois hypothèses peuvent être émises concernant le codage neural des deux systèmes graphiques : d'abord, si le réseau est totalement universel, les deux systèmes pourraient recruter les mêmes régions de la même manière, et donc ne pas être discriminables. Une autre hypothèse est que les activations liées à l'écriture des deux systèmes graphiques sont localisées dans des régions, en partie, spatialement distinctes. Enfin, une dernière hypothèse est que les deux systèmes sont codés dans les mêmes régions mais avec des patterns d'activité distincts.

Initialement l'étude en IRM fonctionnel comprenait deux parties :

- Une session indépendante contenant des blocs de lettres arabes et latines à écrire et une situation graphomotrice de contrôle (production de traits en diagonale (« / » et « \ »)). Pour apparier la durée de production entre les lettres et la situation contrôle, les participants réalisaient quatre aller-retours. Pour maintenir le sujet impliqué dans la tâche, les deux directions de traits étaient utilisées. Contraster l'écriture des lettres arabes à la situation contrôle et l'écriture des lettres latines à la situation contrôle devait nous permettre d'observer le réseau impliqué dans chacun des systèmes graphiques. Malheureusement, ces contrastes n'ont pas révélé d'activations significatives chez la plupart des sujets, probablement parce que la situation de contrôle était beaucoup plus complexe sur le plan cognitif que l'écriture des lettres, une tâche très automatisée. Des résultats comparables ont été observés en comparant l'écriture au dessin (Planton et coll., 2017).
- La seconde partie, consistait en 7 sessions dans lesquelles les participants devaient écrire les lettres arabes et latines, présentée en évènement, permettant à la fois une analyse univariée classique et une analyse de type MVPA (Multi-Voxel Pattern Analysis) qui permettait de voir si le codage des deux systèmes graphiques au sein d'une même région différait.

Ce protocole expérimental devait également permettre une analyse en RSA (*Representational Similarity Analysis*) qui aurait permis de déterminer encore mieux quelles caractéristiques des lettres écrites étaient codées dans chaque région impliquée dans la tâche. Cependant cette analyse, très complexe, n'a pu être terminée pendant cette thèse car nous nous sommes focalisés dans un premier temps sur les analyses en MVPA. L'apport possible d'une analyse en RSA et les perspectives auxquelles elle pourrait conduire sont abordés en discussion.

La partie expérimentale rapportée dans ce manuscrit est composée de trois parties : nous rapportons tout d'abord l'analyse comportementale de l'écriture des lettres arabes et latines chez un groupe de participants bigraphes experts. Puis nous rapportons les résultats de l'analyse univariée des 7 sessions en évènementiel et l'analyse MVPA de ces mêmes sessions.

1. Caractérisation graphomotrice des lettres latines et arabes

À notre connaissance, les caractéristiques graphomotrices des lettres arabes et latines n'ont pas été directement comparées même si dans son ouvrage, Van Sommers (1984) décrit brièvement les mouvements graphiques que produisent des scripteurs qui écrivent les deux types de caractères alphabétiques et observe que ces mouvements diffèrent dans l'orientation générale des tracés. Dans la première expérience comportementale que nous allons présenter, réalisé préalablement à l'étude en IRMf que nous présenterons ensuite, nous avons donc analysé précisément la production des caractères des deux alphabets en étudiant différentes variables de l'écriture : des variables spatiales, temporelles, cinématiques, et relatives à la forme et la direction des traits composant les lettres. Les buts de cette première expérience comportementale étaient de mieux comprendre comment les caractères de chacun des alphabets sont tracés et de choisir, pour l'expérience en IRMf, des caractères des deux alphabets à comparer qui sont de complexité graphomotrice équivalente afin d'en faciliter l'interprétation des résultats.

1.1. Méthodes

1.1.1. Participants

Onze bigraphes experts arabe/français droitiers, ont été inclus dans cette étude (10 femmes ; âge moyen : 31,5 ans). Les participants ont commencé à apprendre le français et l'arabe avant l'âge de 10 ans et se considèrent comme experts en français et en arabe, tant à l'oral qu'à l'écrit. Néanmoins, afin de connaître l'âge d'acquisition des deux langues ainsi que leur niveau de compétence et leur niveau actuel d'exposition à chacune, les participants ont répondu à une version adaptée du questionnaire LEAP (Marian et coll., 2007). L'âge moyen auquel l'apprentissage de la littératie (écriture et lecture) a commencé était de 6,3 ans pour le français et de 6,2 ans pour l'arabe. Le niveau moyen actuel d'exposition au français et à l'arabe parlés était de 44,5% et 50,25%

respectivement, tandis que le niveau moyen actuel d'exposition au français et à l'arabe écrits était de 67,5% et 30,4% respectivement. Pour l'exposition à l'oral et à la lecture/écriture, le pourcentage restant correspondait principalement à l'anglais. L'exposition actuelle plus forte pour le français que pour l'arabe peut s'expliquer par le fait que les participants aient été recrutés en France.

1.1.2. Tâche et procédure

Les participants ont copié deux fois chacune des 28 lettres isolées de l'alphabet arabe et des 26 lettres minuscules de l'alphabet latin sur une feuille de papier blanc fixée sur une tablette graphique (Intuos Pro Large, PTH 851 ; Wacom ; fréquence d'échantillonnage, 100 Hz), en utilisant un stylo à bille dédié (Intuos Ink Pen). Les lettres de chaque alphabet ont été écrites en blocs. Les quatre blocs (2 alphabets × 2 répétitions) étaient croisés (latin/arabe/latin/arabe). Les participants ont effectué la tâche dans leur position assise habituelle, avec retour visuel sur leur production écrite. L'analyse des lettres produites a été faite sur la deuxième production uniquement.

1.1.3. Analyse des données

Le profil de vitesse a été utilisé pour décomposer chaque lettre en traits de la façon suivante : tout d'abord, nous l'avons 'lissé' avec un filtre de 5 Hz (Meulenbroek & van Galen, 1986), ensuite, la limite entre deux traits consécutifs a été localisée au niveau du minimum local de vitesse (van Galen, 1991). Nous avons comparé le **nombre de traits** par lettre entre les lettres arabes et latines. Afin de caractériser la composante motrice des lettres, chaque trait a été classé comme droit ou courbe. Les traits droits étaient classés selon leur direction (vers le haut, vers le bas, vers la gauche et vers la droite), les traits diagonaux étaient décomposés et classés selon la direction horizontale et la direction verticale (par exemple, un trait tracé vers le haut et vers la gauche était compté à la fois comme haut et gauche). Les traits courbes étaient classés dans deux catégories : dans le sens horaire ou dans le sens anti-horaire (le sens des courbes ; figure 48). Pour chaque orientation (horizontale et verticale), nous avons calculé le pourcentage de traits dans chaque direction par rapport au nombre total de traits dans cette orientation. Nous

avons analysé le **pourcentage de traits verticaux tracés vers la droite** et le **pourcentage de traits horizontaux tracé vers la gauche**. Nous avons également calculé le pourcentage de traits dans le sens horaire et anti-horaire par rapport au nombre total de traits courbes et analysé le **pourcentage de traits tracés dans le sens horaire**. Les deux systèmes graphiques ont également été comparé selon le **nombre de lever de stylo** au sein des lettres.

Nous avons comparé les pourcentages moyens de chaque variable par lettre entre les deux alphabets en utilisant des tests de Wilcoxon pour échantillons appariés.

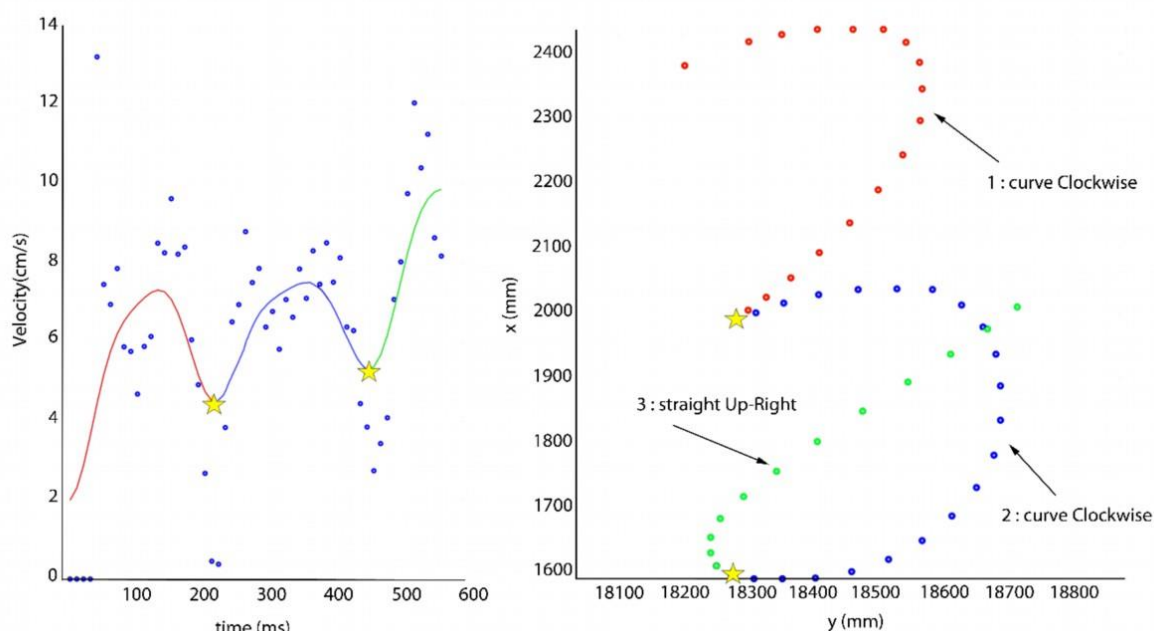


Figure 48 : Exemple de la décomposition d'une lettre. Gauche : Profil de vitesse lissé en fonction du temps. Droite : Représentation spatiale des coordonnées x et y. Les étoiles jaunes représentent la localisation des minima de vitesse et les couleurs correspondent aux différents traits.

Nous avons également les deux systèmes graphiques sur la **longueur** de la trace écrite. Enfin, nous avons comparé les variables temporelles et cinématiques suivantes : la **durée totale** de l'écriture, la **durée des mouvements en l'air et tracés**, la **vitesse moyenne** et la différence signal-bruit des pics de vitesse (appelée en anglais **SNvpd** pour « Signal-to-Noise velocity peaks difference »), une mesure de la fluidité du mouvement (Danna et coll., 2013). Pour ces variables, nous avons construit des modèles linéaires à effets mixtes en

utilisant la librairie 'lme4' (Bates et coll., 2015) dans R (version 3.4.4 ; R Core Team 2017). Le système graphique (arabe vs latin) a été entré comme effet fixe, et les sujets et les lettres comme effets aléatoires, en prenant un intercept et une pente pour chaque effet aléatoire. Les conditions d'application des modèles linéaires (linéarité, normalité des résidus et homoscédasticité) ont été vérifiées graphiquement et n'ont pas montré de non-respect de ces conditions. La significativité des résultats a été évaluée à l'aide de la librairie 'lmerTest' (Kuznetsova et coll., 2017).

1.2. Résultats

1.2.1. Nombre de traits et direction

L'analyse statistique n'a pas révélé de différence entre l'arabe et le latin en termes de nombre de traits (3,62 et 3,36 par lettre respectivement ; $V = 50,00$; $p = 0,15$). Pour les traits verticaux, il n'y avait pas de différence dans le pourcentage de traits de bas en haut entre l'arabe et le latin (51,53% et 42,28% respectivement ; $V = 51,00$; $p = 0,12$). Cependant, pour les traits horizontaux, les participants ont produit significativement plus de traits de droite à gauche dans l'alphabet arabe que dans l'alphabet latin (45,82% et 24,13% respectivement ; $V = 60,00$, $p = 0,014$). Enfin, pour les traits courbes, les participants ont produit plus de traits dans le sens horaire en arabe qu'en latin (69,55% et 26,72% respectivement ; $V = 66,00$, $p < 0,001$). Il est intéressant de noter que les participants ont produit plus de levers en arabe qu'en latin (0,79 et 0,23 respectivement ; $V = 66,00$, $p < 0,001$; figure 49).

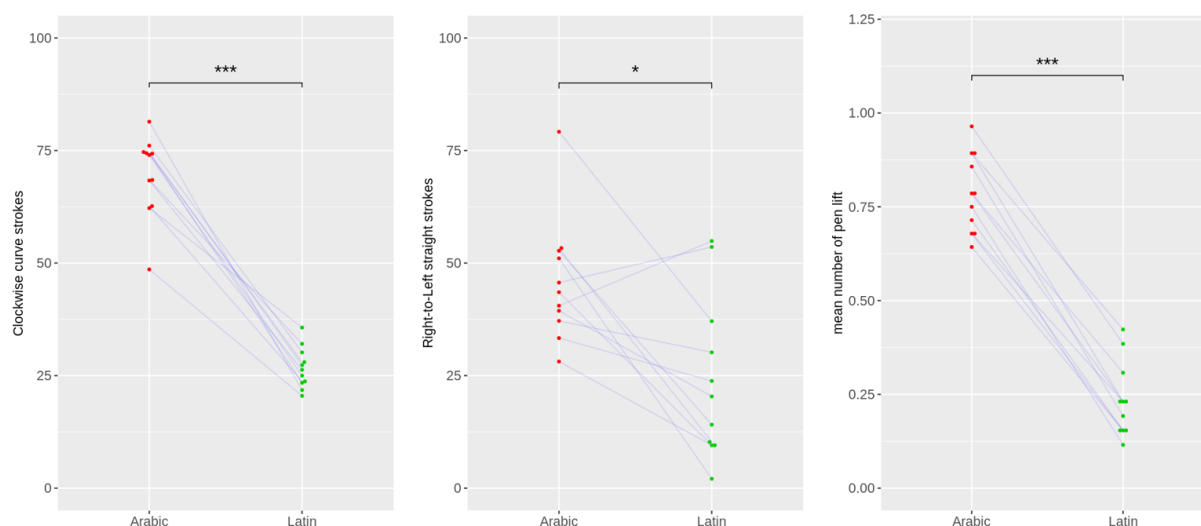


Figure 49 : Différences dans l'écriture des lettres arabes (rouge) et latines (vert). Chaque point correspond à la moyenne d'un participant en fonction du système graphique. Gauche : pourcentage de courbes produites dans le sens horaire. Centre : pourcentage de traits horizontaux produit dans le sens droite-gauche. Droite : Nombre de levés.

1.2.2. Variable spatiale, temporelles et cinématiques

Il n'y avait pas de différence significative dans la longueur de la trace écrite entre l'arabe et le latin (19,50 mm et 20,11 mm respectivement, estimation = 0,62, SE = 1,60, $t(51,81)=0,39$, $p = 0,70$). Il n'y avait pas non plus de différence entre l'arabe et le latin en termes de durée du mouvement écrit (466 ms et 434 ms respectivement, estimation = -27,08, SE = 30,64, $t(48,51) = -0,88$, $p = 0,38$). Enfin, nous n'avons pas trouvé de différence significative dans la vitesse d'écriture (44,72 mm/s et 48,41 mm/s respectivement, estimation = 3,71, SE = 2,27, $t(45,67) = 1,64$, $p = 0,11$), ni dans la fluidité de l'écriture (le SNvpd) (0,14 et 1,31 respectivement, estimation = -0,16, SE = 0,11, $t(51,12) = -1,51$, $p = 0,11$).

Cependant, l'arabe avait une durée d'écriture totale plus longue que le latin (586 ms et 490 ms respectivement ; estimation = -96,74 ms, SE = 43,95, $t(52,00) = -2,20$, $p = 0,030$). Ceci s'explique par une différence significative entre les deux systèmes graphiques en termes de durée du mouvement en l'air (137 ms et 34 ms respectivement ; estimation = -102.31, SE = 22.54, $t(37.64) = -4.54$ $p < 0.001$).

1.3. Discussion

Les résultats ont indiqué que le nombre de traits, la vitesse d'écriture et la fluidité de l'écriture ne différaient pas entre les lettres latines et arabes, ce qui suggère que la complexité graphomotrice des deux alphabets est comparable chez des adultes ayant appris la lecture et l'écriture des deux langues avant l'âge de 10 ans. Cette observation valide le choix d'une population d'adultes bigraphes précoces pour étudier les corrélats cérébraux de l'écriture des deux jeux de caractères.

Nous avons toutefois observé que les lettres arabes nécessitaient plus de temps pour être écrites que les lettres françaises. Ce temps plus long ne résulte pas d'une différence de longueur de tracé entre les alphabets, mais plutôt du plus grand nombre de levers en arabe qu'en français. En effet, l'alphabet arabe comporte plus de points (où diacritiques) que l'alphabet latin, le nombre et la position des points étant utilisés pour discriminer les lettres (par exemple, "ظ/"zâ/ et "ط/"tâ/). Wiley et coll. (2016) a montré l'importance de ces points dans la reconnaissance des lettres arabes. Nous pensons que ces points sont aussi importants dans la représentation sensori-motrice des lettres arabes.

Il est intéressant de noter que, comme l'avait déjà observé van Sommers, (1984), les directions principales du mouvement sont opposées lors de l'écriture des lettres arabes par rapport aux lettres latines : elles sont principalement dirigées de gauche à droite pour les lettres latines, et davantage dirigées de droite à gauche pour les lettres arabes. De plus, les courbes sont également produites dans des directions opposées : dans le sens horaire (dextrogyre) pour les lettres arabes et dans le sens anti-horaire (lévogyre) pour les lettres latines. Cela confirme des études ayant observé ce sens des courbes dans des tâches de

traçage de lettres chez des adultes et des enfants utilisant le système latin, arabe ou les deux latin (Fagard & Dahmen, 2003 ; Goodnow et coll., 1973). Les lettres sont donc formées par des enchainements de traits ayant des directions préférentielles différentes entre les deux systèmes graphiques. Chez l'expert, chaque lettre est associée à une représentation motrice, spécifiant en particulier ces séquences de direction (Ellis, 1988 ; Margolin, 1984 ; Rapp & Caramazza, 1997 ; Teulings et coll., 1986 ; van Galen, 1991). Dans l'expérience suivante en IRMf, nous allons vérifier si ces différences peuvent entraîner la spécialisation de certaines régions cérébrales, impliquées dans la production de l'écriture, pour l'un ou l'autre des deux systèmes graphiques, chez des adultes bigraphes.

2. Expérience en IRMf

2.1. Méthode et paramètres d'acquisition

2.1.1. Participants

Trente bigraphes arabe/français droitiers ont participé à l'expérience (seize femmes, âgés de 19 à 56 ans ; âge moyen, 25,7 ans). Aucun n'avait participé à l'expérience comportementale précédente. Les participants, qui n'ont fait état d'aucune maladie neurologique et d'aucun trouble des apprentissages, avaient appris le français et l'arabe avant l'âge de 10 ans et se considéraient comme experts en compréhension et expression orales, en lecture et en écriture, dans les deux langues. L'âge moyen du début de l'apprentissage de la lecture/écriture était de 6,4 ans pour le français et de 5,5 ans pour l'arabe. Le niveau actuel d'exposition au français et à l'arabe parlés était respectivement de 42,5 % et 32,5 % en moyenne, tandis que l'exposition actuelle au français et à l'arabe écrits était respectivement de 61,9 % et 22,0 %. Pour l'exposition à l'oral et à la lecture/écriture, les pourcentages restants correspondaient principalement à l'anglais. Cette étude a reçu l'approbation du Comité d'éthique (N° RCB 2010- A00155-34 ; CNRS). Les participants ont signé un formulaire de consentement écrit après que la procédure leur ait été expliquée en détail et ont reçu une somme de 40 euros pour leur participation.

Au départ, l'expérience incluait 35 participants, mais cinq ont été écartés à la suite de problèmes techniques pendant l'acquisition.

2.1.2. Stimuli

Nous avons sélectionné 16 lettres arabes et 16 lettres latines qui étaient appariées en termes de complexité visuelle (en utilisant sur la méthode de Wiley et coll., 2016), et de complexité graphomotrice (définie par la durée d'écriture et le nombre de traits mesurés à partir de l'expérience comportementale décrite précédemment). La durée moyenne d'écriture des lettres choisies était de 528 ms pour l'arabe et de 493 ms pour le latin ($t(10)$

= 1,30, $p = 0,22$). Le nombre moyen de traits était de 3,47 pour les lettres arabes et de 3,27 pour les lettres latines ($t(10) = 0,68$, $p = 0,51$). Enfin, les lettres avaient plus de levers de stylo en arabe ($m = 0,64$) qu'en latin ($m = 0,28$, $t(10) = 11,47$ $p < 0,001$), ce qui est, comme nous l'avons vu, plus fréquent dans les lettres arabes. Les stimuli sont présentés dans la figure 50 et les caractéristiques visuelles de chaque lettre sont disponibles en annexe 10. Les caractéristiques motrices de chaque lettre sont également disponibles en annexe 11.



Figure 50 : lettres arabes et latines présentées pendant la session IRM.

Les lettres étaient affichées en blanc sur fond noir, au centre d'un cadre blanc. L'écran couvrait environ 5,86 degrés du champ visuel. Les lettres arabes étaient écrites dans la police « traditional Arabic » et les lettres latines dans la police « CAC Champagne », une police cursive choisie pour deux raisons : 1) sa similitude visuelle avec les lettres arabes (car les caractères d'imprimerie arabes sont du manuscrit) et 2) sa similitude avec les lettres latines manuscrites. Il n'y avait pas de différence dans le nombre de pixels de chaque police : le nombre moyen de pixels pour l'arabe était de 2 709 pixels, alors qu'il était de 2 710 pixels pour le latin ($t(29,85) = -0,01$, $p = 0,10$).

2.1.3. Matériel

Les mouvements d'écriture ont été enregistrés à l'aide d'une tablette tactile compatible avec l'environnement IRM et d'un stylo en PVC (Longcamp et coll., 2014). Le dispositif était composé d'un écran tactile avec une plage de force comprise entre 0,1 N et 0,8 N (Apex Material Technology Corp.) et d'une carte contrôleur USB avec une fréquence

d'échantillonnage de 100 Hz (TSHARC-10 ; Hampshire Company). La résolution de l'écran tactile était de 1 280 × 1 024 pixels, avec une précision spatiale de 0,3 mm. Les coordonnées (x et y) ont été enregistrées en fonction du temps. La synchronisation entre la présentation du stimulus et l'enregistrement cinématique a été effectuée à l'aide d'un logiciel personnalisé développé dans l'environnement LabVIEW de National Instruments. La tablette était placée sur le ventre du participant, légèrement surélevée et inclinée à l'aide d'un coussin (figure 51). Le participant pouvait ajuster la position de la tablette pour pouvoir écrire confortablement pendant l'expérience et il écrivait d'abord quelques lettres avec un retour visuel pour s'entraîner à écrire dans cette position allongée. Les stimuli visuels étaient présentés au participant à l'aide d'un système de miroirs placés devant ses yeux, qui relayaient les stimuli projetés par un vidéoprojecteur sur un écran situé à l'arrière du scanner.

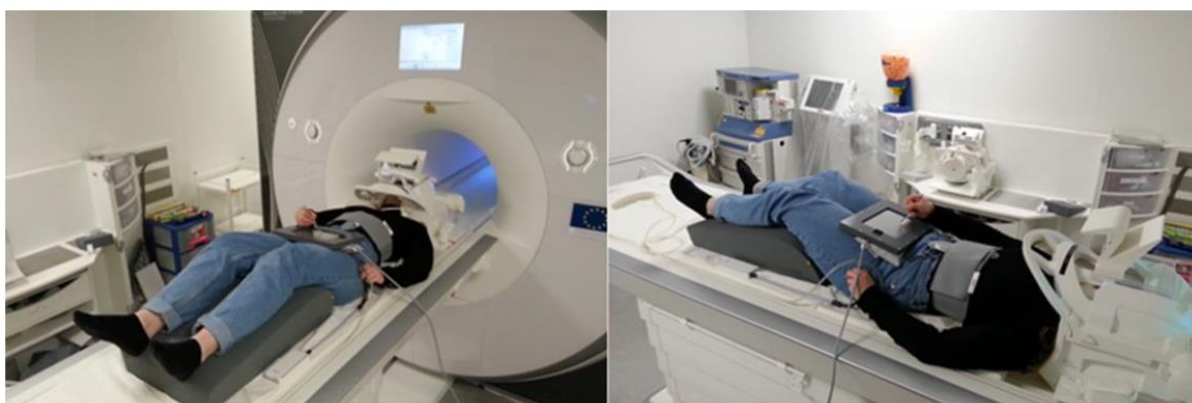


Figure 51 : Position occupée par les participants avant d'entrer dans l'IRM. Dans notre expérience, le cadre de la tablette était plus petit, permettant au participant de poser confortablement sa main sur le rebord de la tablette.

2.1.4. Procédure

Les participants devaient copier des lettres isolées dans un temps limité, sans feedback visuel. Ce choix méthodologique a été fait pour amener les participants à écrire rapidement sur la base de leur représentation motrice interne des caractères, sans évaluer en permanence visuellement leur performance pendant l'écriture. Ecrire une

lettre isolée sans retour visuel ne pose aucun problème et les sujets avaient de plus bénéficié d'un entraînement à cette tâche avant de faire l'expérimentation proprement dite. Ils avaient pour instruction de commencer à écrire dès que la lettre était présentée. Chaque essai commençait par une croix de fixation de 200 ms, puis une lettre était présentée au centre d'un carré pendant 200 ms puis disparaissait. Le carré persistait pendant 1540 ms indiquant au participant qu'il devait écrire (figure 52). Le carré était suivi d'un écran vide pendant 1950 ms. Les 16 lettres arabes et les 16 lettres latines étaient présentées mélangées de manière pseudo-aléatoire dans la même session, une fois par session. Chaque lettre n'était jamais précédée ou suivie de la même lettre d'une session à l'autre. Chaque session contenait également cinq essais vides utilisés pour l'estimation du signal de base. Sept sessions ont été effectuées pour tous les participants. La durée totale d'une session était de 2 minutes et 30 secondes.

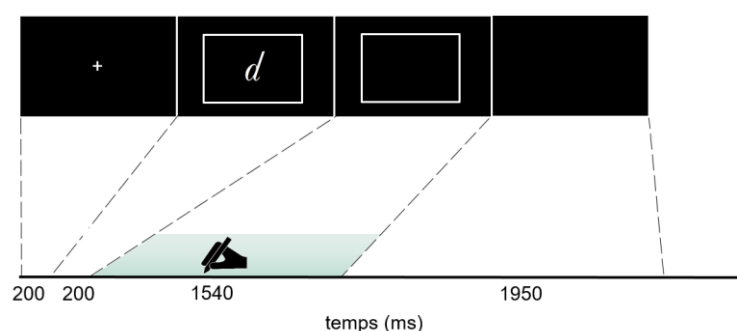


Figure 52 : Organisation temporelle d'un essai.

2.1.5. Acquisition IRM

Les images IRM anatomique et fonctionnelles ont été recueillies à l'aide d'un scanner 3-T Siemens Prisma (Siemens, Erlangen, Allemagne) avec une bobine de tête à 64 canaux. La session d'IRM se terminait par l'acquisition de l'image anatomique haute résolution pondérée en T1, avec une résolution de voxel de 1 mm³ (séquence MPRAGE, TR/TE/TI = 2 300/2,98/1 190 ms, angle de bascule = 9°, GRAPPA = 3). Les images fonctionnelles ont été acquises à l'aide d'une séquence EPI (Echo-Planar Imaging) 2D avec un facteur d'accélération multi-bande de 4 (Moeller et coll., 2010) de 52 coupes couvrant l'ensemble

du cerveau de haut en bas et une taille de voxel de 2,5 mm³ (TR = 871 ms, TE = 30 ms, angle de bascule = 56°, taille de la matrice : 84 × 84, FOV = 210 mm² × 210 mm²). Chaque session comprenait 172 volumes au total. Pour cartographier et corriger les distorsions liées aux inhomogénéités du champ magnétique, la session d'IRMf commençait par l'acquisition de deux séquence EPI en écho de spin avec une direction de codage de phase opposée (TR/TE = 7 700/58 ms). Pendant les acquisitions fonctionnelles, le programme Framewise Integrated Real-time MRI Monitoring (FRIMM) (Dosenbach et coll., 2017) a été utilisé pour vérifier les mouvements de tête en temps réel.

2.1.6. Analyse et résultats des données comportementales

L'ensemble des essais (224 par sujets) a été vérifié visuellement pour s'assurer que la tâche avait été correctement réalisée. Chaque essai a été placé dans l'une des catégories suivantes : « essai correct » ; « fin de l'essai manquante » (divisée en « fin de la lettre manquante » et « point manquant ») ; « erreur » ; « vide » ; et « illisible ». Les essais « erreur », « vide » et « illisible » n'ont pas été inclus dans l'analyse de la durée d'écriture. Pour les données des autres catégories, nous avons effectué des tests de Wilcoxon appariés sur le pourcentage par sujet pour vérifier que la quantité d'essais dans chaque catégorie ne différait pas entre les systèmes graphiques arabe et latin. Nous avons mesuré et analysé la durée d'écriture après avoir éliminé les valeurs extrêmes qui s'écartaient de plus de 2,5 écarts-types de la moyenne de chaque sujet et de chaque condition (arabe/latin). Sur la base de cette procédure de rejet des valeurs extrêmes, 46 essais ont été retirés de l'analyse statistique. Nous avons effectué une analyse par modèle mixte linéaire comme décrit ci-dessus dans les Méthodes de la pré-expérience.

De façon générale, il y a eu peu d'essais dans les catégories « erreur », « vide », et « illisible » (0.05%, 0.56%, et 1.17% respectivement). Nous avons trouvé plus d'essais « fin de l'essai manquante » en arabe (m = 8.27%) qu'en latin (m = 3.49% ; V = 372.50, p < 0.001). Cet effet est dû à un nombre significativement plus élevé d'essais dans lesquels des points manquent dans les lettres arabes que dans les lettres latines (m = 10,64 et m =

1,55 respectivement ; $V = 376,50$, $p < 0,001$). Les lettres arabes ont donné une durée d'écriture plus longue ($m = 781$ ms) que les lettres latines ($m = 704$ ms), mais cette différence n'était pas significative (estimation = -76 ms, $SE = 53,60$, $t(23,23) = -1,42$, $p = 0,17$).

Les traitements et méthodes d'analyse propres à chaque type d'analyses sont décrits dans chaque partie avec résultats et discussion.

2.2. Analyse univariée

2.2.1. Méthode

2.2.1.1. Prétraitement des données IRMf

Les données IRMf ont été prétraitées et analysées avec le logiciel SPM12 (Statistical Parametric Mapping, Wellcome Department of Imaging Neuroscience, University College London, <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm>).

Avant de pouvoir analyser à proprement parler le signal d'IRMf, différentes étapes de pré-traitement doivent être réalisées pour nettoyer le signal de différents types d'artefacts. La première étape de pré-traitement consiste à corriger les possibles distorsions spatiales liées à l'inhomogénéité du champ magnétique B0. Pour cela, lors de l'acquisition des données, une séquence « fieldmap » est acquise et reflète cette inhomogénéité. Cette « fieldmap » va nous permettre de calculer une carte qui, appliquée aux images fonctionnelles, permettra de corriger cette première source d'artefacts. La deuxième source d'artefact en IRM vient des mouvements que peut effectuer le sujet pendant l'acquisition, pouvant également entraîner une distorsion spatiale des images. Les images fonctionnelles des différentes sessions ont été réalignées sur une image fonctionnelle moyenne à l'aide de six paramètres de mouvements (trois translations et trois rotations). L'image anatomique a été réalignée (ou coregistrée) avec les images fonctionnelles. L'image anatomique a ensuite été segmentée : matière grise, matière blanche, LCR, tissus osseux, tissus mous et tissus résiduels de l'image. Pour pouvoir réaliser l'analyse de groupe et pour pouvoir comparer les localisations avec celles de la littérature, les images anatomiques et fonctionnelles ont été normalisées vers l'espace standardisé du MNI (source). Enfin, les images fonctionnelles ont été lissées spatialement en pondérant la valeur d'un voxel par celle des voxels voisins, en utilisant un filtre gaussien de FWHM (*'Full Width at Half Maximum'*) correspondant à deux fois la taille du voxel, soit 5mm³.

2.2.1.2. Analyses

Les analyses statistiques ont été effectuées selon le modèle linéaire général (Friston et coll., 1995). Dans le modèle statistique de premier niveau, les conditions d'intérêt ont été modélisées sous forme de fonctions « boxcar » (en créneau) convoluées avec la fonction de réponse hémodynamique canonique. Le modèle contenait un régresseur par système graphique, où l'onset de chaque essai était codé au moment de l'apparition de la présentation visuelle de la lettre, et un régresseur où l'onset de chaque essai était entré au début effectif de l'écriture, avec la durée d'écriture de chaque essai comme modulateur paramétrique (incluant tous les essais indépendamment des systèmes graphiques). L'objectif de ce régresseur paramétrique était double : 1) évaluer le réseau impliqué dans le contrôle sensori-moteur des mouvements d'écriture ; 2) éliminer par régression les éventuelles différences entre les deux conditions qui pourraient être liées à des différences de bas niveau dans l'exécution motrice (Longcamp et coll., 2014). Nous avons également ajouté un régresseur distinct pour les erreurs lorsque cela était nécessaire. Pour l'un des participants, l'acquisition de la cinématique d'écriture n'a pas fonctionné pour deux sessions, la durée d'écriture moyenne par lettre dans les cinq autres sessions a été utilisée. Pour un autre participant, l'acquisition de la cinématique n'a pas fonctionné pour l'ensemble des sessions. Nous avons utilisé la durée moyenne de chaque lettre faite par les autres participants. Nous avons également ajouté des régresseurs pour les variables confondues : 24 régresseurs liés aux mouvements de la tête (six séries temporelles classiques de paramètres de réalignement (trois translations et trois rotations), leurs séries temporelles au carré et leurs dérivés temporelles). La boîte à outils « PhysIO » de « TAPAS » a été utilisée pour tenir compte du bruit physiologique (Kasper et coll., 2017). « PhysIO » permet d'estimer directement à partir de données, des composantes du bruit physiologique. Le bruit physiologique est estimé en calculant une analyse en composantes principales sur les données BOLD des masques de la substance blanche et du liquide céphalo-rachidien érodé (les variations du signal dans ces régions n'ont pas de rapport avec les variations du signal BOLD qui nous intéressent dans la matière grise). Vingt-six composantes principales ont été utilisées comme régresseurs de nuisance dans le GLM (12 composantes pour chacune des deux régions, et deux régresseurs qui modélisaient la moyenne des composantes principales de chaque région

en utilisant la méthode « aCompCor », Behzadi et coll., 2007). Les participants ont effectué la tâche avec un mouvement de tête très limité (le déplacement moyen était de 0,13 mm, sd = 0,07).

Analyse cerveau entier

Les analyses de second niveau de l'effet de la durée d'écriture ont été effectuées à l'aide d'un test t à échantillon unique. Les analyses de second niveau effectuées pour comparer les lettres arabes et latines ont été réalisées avec des tests t à un échantillon sur les contrastes arabe > latin et latin > arabe. Les activations étaient considérées comme significatives si elles atteignaient un seuil de $p < 0,001$ non corrigé pour les comparaisons multiples au niveau du voxel, et un seuil corrigé par FWE de $p < 0,05$ au niveau du cluster.

Analyse en régions d'intérêt

Nous voulions spécifiquement tester si le réseau de l'écriture était affecté par le système graphique produit. Nous avons donc, en plus de l'analyse cerveau entier, créé quatre régions d'intérêt dans l'espace MNI en nous basant sur une méta-analyse réalisée par Planton et coll. (2013), qui ont décrit trois régions spécifiques à l'écriture (le PMd gauche, le SPL gauche et le cervelet droit). Bien que le cortex moteur primaire (M1) ne soit pas une région spécifique de l'écriture, nous l'avons ajouté comme région d'intérêt car il est fortement impliqué dans l'écriture et code pour la trajectoire des traits composant les lettres (Kadmon Harpaz et coll., 2014). Les régions d'intérêt ont été définies par des sphères de 10 mm de rayon à l'aide de la boîte à outils « MarsBaR » (Brett et coll., 2012), centrées sur les coordonnées précédemment décrites : M1 gauche, [-34, -26, 60] ; PMd gauche, [-22, -8, 54] ; SPL gauche, [-32, -38, 56] ; cervelet postérieur droit (postCereb), [4, -66, -16] (Planton et coll., 2013). La localisation des quatre régions d'intérêt est présentée dans la figure 53. Dans chaque région, nous avons extrait le bêta moyen du régresseur correspondant aux lettres arabes et à celui des lettres latines, par sujet, en utilisant « MarsBaR ». Nous avons calculé les contrastes par paires entre les deux systèmes graphiques. Le seuil de signification a été corrigé pour les comparaisons multiples en utilisant la méthode de Bonferroni (pour le nombre de régions d'intérêt testées : 4).

2.2.2. Résultats de l'analyse univariée

Effets paramétriques de la durée de l'écriture :

Nous avons identifié un réseau cérébral modulé par la durée de l'écriture (tableau 25 et figure 53). Ce réseau était composé d'un ensemble de régions pariéto-frontales, principalement latéralisées dans l'hémisphère gauche, incluant : le cortex sensori-moteur gauche, les régions pariétales supérieures bilatérales et, dans l'hémisphère gauche les régions frontales inférieures, les régions sous-corticales gauches (thalamus et putamen), et la partie antérieure droite du cervelet.

Location		MNI Coordinates			Size	p(FWE-cor) cluster level	Z	
		x	y	z				
L Frontal	Precentral Gyrus	-38	-16	50	1944	0.00	7.48	(2)
	Inferior Oper	-60	9	23	112	0.00	5.86	(1)
R Frontal	Precentral Gyrus	60	6	26	68	0.001	4.90	(6)
	Frontal sup/Precentral	25	-4	60	38	0.020	3.89	(5)
L Parietal	SPL	-18	-66	56	230	0.00	5.85	(3)
R Parietal	SPL	22	-61	66	155	0.00	5.15	(4)
L Temporal	Thalamus	-15	-21	6	53	0.003	4.99	(8)
	Putamen	-25	-8	3	74	0.00	4.82	(7)
R Cerebellum anterior		12	-46	-20	617	0.00	6.57	(9)

Tableau 25 : Régions dont l'activité était modulée par la durée d'écriture. Le numéro entre parenthèse dans la dernière colonne correspond à celui indiqué dans la figure x.

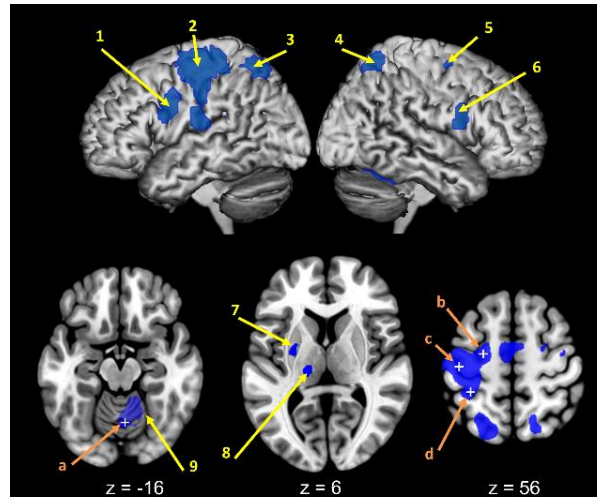


Figure 53 : Régions dont l'activité est modulée par la durée d'écriture, indépendamment du système graphique. Les valeurs statistiques et les coordonnées des activations se trouvent dans le tableau x (référéncées par les numéros correspondants). Les croix blanches représentent les centres des régions d'intérêt (a, postCereb ; b, PMd ; c, M1 et d, SPL).

Effet principal du système graphique : analyse en ROI

Avant correction pour comparaisons multiples, toutes les régions d'intérêt étaient plus impliquées pour les lettres arabes que latines. Après correction, seul le SPL gauche et le cervelet postérieur droit différaient significativement entre les deux systèmes graphiques (tableau 26).

Region	mean beta Arabic	mean beta Latin	t	df	p-value	Bonferroni adjusted
M1	90.51	89.43	2.34	29	0.027	0.106
PMd	28.59	27.94	2.49	29	0.019	0.075
SPL	37.12	36.20	2.76	29	0.010	<0.05
Cervelet	6.96	6.20	2.95	29	0.006	<0.05

Tableau 26 : Résultats des comparaisons des deux systèmes graphiques dans les 4 régions d'intérêt.

Effet principal du système graphique : analyse cerveau entier

Le contraste arabe > latin a entraîné une activation significative dans le SPL droit (coordonnées MNI [18, -48, 58], taille = 92voxels ; $t = 5,56$, FWE-corr pour le cluster. $P < 0,001$; figure 54, gauche). Le contraste latin > arabe a donné lieu à deux clusters d'activation significatifs dans le lobe occipital droit (figure 54, droite ; groupe 1 : coordonnées MNI [22, -98, -2], taille = 56voxels ; $t = 8,15$, FWE-corr. $P = 0,002$; groupe 2 : coordonnées MNI [18, -68, -7], taille = 32voxels ; $t = 5,09$, FWE-corr. $P = 0,042$). Nous avons examiné si ces activations faisaient partie du réseau d'exécution de l'écriture et nous avons constaté qu'elles ne se chevauchaient pas, ou très peu (le cluster arabe > latin chevauchait de 2,2 % le réseau modulé par la durée d'écriture, et les deux clusters latin > arabe de 0 %).

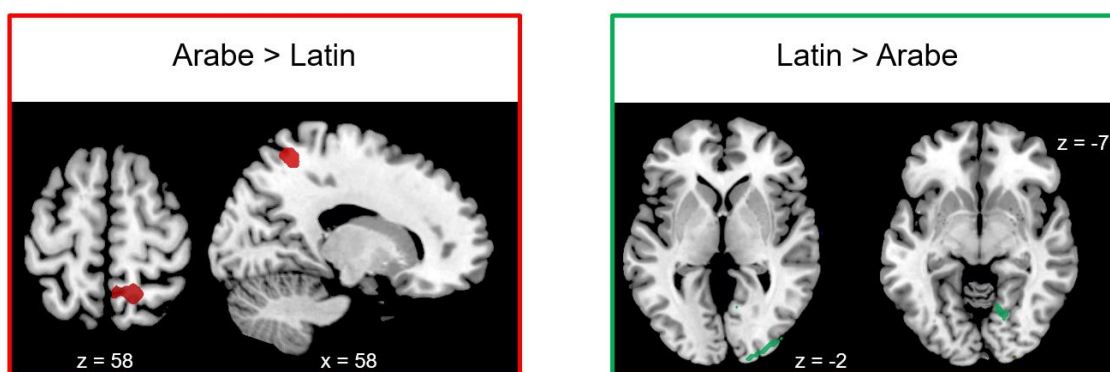


Figure 54: Résultats de l'analyse cerveau entier pour l'effet principal du système graphique.

2.2.3. Discussion

Nous avons constaté que l'écriture chez les bigraphes arabe/français engageait un réseau latéralisé à gauche, incluant M1, le PMd, le SPL et le cervelet droit. Globalement, le réseau cérébral impliqué dans l'écriture des deux alphabets correspond au réseau classique décrit pour la production de l'écriture (Planton et coll., 2013; Purcell et coll., 2011a). Néanmoins, au sein de ce réseau, nous avons constaté que deux régions, le SPL gauche et le cervelet postérieur droit, présentaient une plus grande activation pendant l'écriture arabe que pendant l'écriture latine. L'analyse en cerveau entier a également révélé des différences entre les deux systèmes graphiques dans l'hémisphère droit, avec une plus grande activation du SPL pour les lettres arabes que pour les lettres latines et une plus grande activation des régions occipitales pour les lettres latines que pour les lettres arabes.

2.2.3.1. Régions activées préférentiellement pour les lettres arabes par rapport aux lettres latines : aspects « topocinétiques » et préférences biomécaniques ?

Le SPL gauche, le SPL postérieur droit et le cervelet droit étaient plus fortement activés pour les lettres arabes que pour les lettres latines. La région d'intérêt du SPL gauche appartient au réseau de l'écriture et est située près de la partie antérieure du sillon intrapariétal (BA40/BA7 ; Planton et coll., 2013). L'activation pariétale droite était plus postérieure et médiane. Les activations pariétales et cérébelleuses étaient plus fortes pour l'arabe, mais pas exclusives à ce système graphique. Le même type de réponse préférentielle à une catégorie de stimuli graphiques a été précédemment rapporté dans le domaine moteur par Longcamp et coll. (2014), qui ont comparé l'écriture de lettres et de chiffres.

Contrairement aux résultats d'études précédentes comparant l'écriture de deux systèmes graphiques, comme le kanji et le kana (Nakamura et coll., 2002) ou le chinois et l'anglais (Cao et coll., 2013), cette réponse préférentielle pour les lettres arabes ne peut pas être expliquée par une plus grande difficulté à les produire par rapport aux lettres

latines, car nous avons apparié les lettres sur la base de leur complexité graphomotrice. De plus, nous avons éliminé du contraste la variabilité liée à la durée d'écriture entre les lettres arabes et latines, avec le régresseur paramétrique.

Au moins deux explications, qui ne s'excluent pas mutuellement, peuvent rendre compte du développement d'une réponse préférentielle pour les lettres arabes dans le système sensori-moteur. Ces explications découlent des caractéristiques graphomotrices des deux systèmes graphiques. L'écriture manuscrite comprend des composantes morphocinétiques et topocinétiques, qui reposent sur des processus différents et impliquent des mécanismes de contrôle différents (Paillard, 1990). La composante morphocinétique fait référence au mouvement nécessaire pour tracer la forme principale de la lettre. Chaque lettre est caractérisée par une séquence spécifique de mouvements, qui constitue un programme moteur mémorisé pendant l'apprentissage de l'écriture. Ce programme moteur peut être déployé de manière proactive (Paillard, 1990). La composante morphocinétique permet donc de produire la forme de chaque lettre lorsque le stylo est en contact avec la surface graphique. En revanche, la composante topocinétique fait référence au positionnement spatial des éléments supplémentaires de la lettre, tels que la barre du t ou le point sur le « i », par des mouvements en l'air. Elle nécessite une représentation spatiale précise de la lettre et est davantage sous contrôle visuel en directe, en fonction de l'espace graphique et de la position de la main (Paillard, 1990; Teasdale et coll., 1993).

Une caractéristique des lettres arabes est qu'elles contiennent plus de points que les lettres latines, et que le positionnement de ces points est crucial pour éviter toute confusion avec une autre lettre ; elles nécessitent donc plus de levers de stylo pour être tracées. Par conséquent, la composante topocinétique des mouvements est plus importante en arabe qu'en latin, ce qui pourrait expliquer le recrutement plus important des populations neuronales pariétales et cérébelleuses observé pour ce système graphique.

D'autre part, nous avons constaté que, même au niveau de la lettre isolée, les deux systèmes graphiques différaient sur la direction préférentielle dans laquelle étaient tracés les traits droits et courbes. En d'autres termes, les séquences d'activations musculaires et l'implication du système musculaire et articulaire qui accompagne les mouvements sont qualitativement différentes dans l'écriture des deux alphabets. Or, certaines préférences

biomécaniques des effecteurs sont fortement ancrées dans le système sensori-moteur. Il existe une tendance naturelle à la direction préférentielle des mouvements graphiques : les droitiers, par exemple, préfèrent tracer les traits de gauche à droite, et forment spontanément les courbes dans le sens antihoraire (Goodnow et coll., 1973 ; van Sommers, 1984). Par conséquent, lorsque les droitiers écrivent en arabe, leurs mouvements sont en opposition avec leurs préférences biomécaniques. Il a été montré que le sens d'écriture pouvait modifier ces préférences directionnelles chez les experts (Eviatar, 1995 ; Nachshon, 1985 ; van Sommers, 1984). Même si l'écriture des deux alphabets est totalement automatisée dans notre population d'experts, la spécificité fonctionnelle de certaines régions pourrait donc être une conséquence de l'opposition entre préférence biomécanique et sens d'écriture lors de l'acquisition de l'écriture arabe.

Ces deux explications concordent avec le rôle fonctionnel des régions activées préférentiellement pour l'arabe décrites dans la littérature. Les lésions du SPL gauche entraînent des symptômes agraphiques avec des erreurs ou des lettres illisibles, et une écriture lente (Magrassi et coll., 2010 ; Sakurai et coll., 2007), suggérant une difficulté dans le contrôle des traits composant les lettres. Selon des études en IRMf, cette région code d'une certaine façon les trajectoires graphomotrices, indépendamment de la taille et de l'effecteur (Haar et coll., 2015 ; Kadmon Harpaz et coll., 2014). Le SPL est également connu pour être le lien d'intégration visuo-spatiale (Caspers et coll., 2012). Une étude récente de Vinci-Booher et coll. (2020) propose que la partie plus postérieure du sillon intra-pariétal serait spécifiquement impliquée lorsque le retour visuel n'est pas habituel, confirmant le rôle d'intégration visuomotrice. Le cervelet, en lien avec le cortex pariétal supérieur, est impliqué dans le contrôle des mouvements de l'écriture manuscrite. Il est considéré comme le siège du calcul des modèles internes qui sont utilisés pour générer des prédictions sur les conséquences sensorielles des mouvements (Wolpert et coll., 1998).

Un résultat important de cette analyse univariée est la mise en évidence du recrutement d'une région du SPL droit pendant l'écriture de lettres arabes. L'hémisphère droit n'appartient pas au réseau de l'écriture connu, néanmoins des activations dans une région du SPL droit ont été rapportées dans quelques études (Planton et coll., 2013). Cette région a été proposée pour jouer un rôle attentionnel dans l'écriture manuscrite, car elle appartient au réseau dorsal de l'attention (Szczepanski et coll., 2013). De manière

intéressante, Haar et coll. (2017) ont également montré que la direction des mouvements produits avec la main droite est codée dans le SPL droit, suggérant que cette zone joue un rôle général dans l'encodage des mouvements. Des activations dans l'hémisphère droit, rejoint la littérature sur la lecture et l'écriture du chinois, suggérant une implication dans le traitement visuo-spatial propre de ces caractères (Cao & Perfetti, 2016 ; Liu & Perfetti, 2003 ; Perfetti et coll., 2013 ; Perfetti et coll., 2007 ; Yang et coll., 2019), confirmant un rôle de cette région dans le traitement des particularités visuo-spatiales des systèmes écrits.

Enfin, une implication plus importante de l'hémisphère droit en arabe a été suggérée, suivant l'observation de certaines études de cas de bigraphes (Boumaraf & Macoir, 2016 ; el Alaoui-Faris et coll., 1994 ; Ibrahim, 2009). Dans ces trois études, il a été observé que la lecture et l'écriture de l'arabe étaient moins affectées, ou donnaient lieu à une récupération plus rapide que celles d'autres systèmes graphiques après une lésion de l'hémisphère gauche. Cela suggère donc qu'une partie des processus nécessaires à la lecture/ écriture peuvent être compensés par les populations neurales situées dans l'hémisphère droit. Cependant, le rôle privilégié de l'hémisphère droit dans la lecture de l'arabe reste à préciser, car il n'est pas observé dans toutes les études (Eviatar et coll., 2004).

2.2.3.2. Régions activées préférentiellement pour les lettres latines par rapport aux lettres arabes : familiarité visuelle ?

Nous avons trouvé deux régions plus activées pour les lettres latines que pour les lettres arabes dans le cortex occipital droit (BA18), appartenant à l'aire V2. Ces activations sont donc probablement liées au traitement visuel des lettres présentées. L'observation d'une préférence neuronale pour les lettres latines dans les régions visuelles précoces de l'hémisphère droit est quelque peu inattendue. Il est intéressant de noter qu'une activation spécifique a été rapportée dans les régions visuelles droites pour les lettres manuscrites par rapport aux lettres en caractère d'imprimerie, dans le gyrus occipital moyen droit (Longcamp et coll., 2011) et dans l'équivalent droit de la VWFA gauche (Barton et coll., 2010 ; Qiao et coll., 2010). Dans les régions visuelles précoces droites,

l'activation plus forte pour les lettres manuscrites peut s'expliquer par une moindre automaticité de la lecture des lettres cursives (Qiao et coll., 2010). Dans notre étude, nous avons sélectionné les lettres en fonction de leur similarité visuelle et de leur niveau d'information motrice (écriture cursive avec des pleins et déliés), au prix de différents niveaux de familiarité avec les polices utilisées. Il est donc possible que l'implication du cortex visuel droit soit liée à une familiarité moins importante de la police utilisée pour les lettres latines.

2.2.4. Conclusion

Chez les bigraphes experts arabe/français, l'analyse univariée traditionnelle a révélé un réseau principalement partagé entre les deux systèmes graphiques, majoritairement latéralisé à gauche, mais également des différences d'activations localisées dans quelques régions restreintes : une plus forte activation pour l'arabe dans le gyrus pariétal supérieur bilatéral et le cervelet droit et pour le français dans le cortex occipital droit. Les activations différentielles pariétales et cérébelleuse ont été interprétées selon les différences motrices et spatiales propres aux deux systèmes graphiques. Dans la partie suivante, nous nous demandons s'il est possible que ces différences entraînent également un codage neural différent des deux systèmes graphiques au sein d'une même région.

2.3. Analyse en MVPA (Multi-Voxel Pattern Analyses)

En comparant l'écriture des lettres arabes aux lettres latines, l'analyse univariée a révélé un réseau principalement partagé entre les deux systèmes graphiques et quelques différences localisées : une plus forte activation pour l'arabe dans le SPL bilatéral et le cervelet droit et pour le français dans le cortex occipital droit. Les activations pariétales et cérébelleuses ont été interprétées selon les différences sensori-motrices et spatiales propres aux deux langues. Cependant, il est possible que certaines parties du réseau impliqué présentent des patterns d'activations qui diffèrent systématiquement pour les deux systèmes, malgré un niveau moyen d'activation similaire.

L'analyse en pattern multivarié (*'Multivariate Pattern Analysis'*, MVPA) prend en compte les patterns d'activation des différentes populations neuronales, plutôt que le degré d'activation global moyen d'une région. Associée à une analyse en classification, elle permet d'étudier l'information contenue dans les patterns d'activité pour déduire le rôle fonctionnel des régions cérébrales (Mur et coll., 2009). Le principe de cette analyse, qui est de catégoriser les essais en fonction d'une dimension est décrit dans l'encadré méthodologique 1.

Même si nous sommes dans une condition n'impliquant pas de mots, la classification des lettres arabes et latines pourrait se faire selon leurs caractéristiques graphomotrices, mais également selon des facteurs visuel, phonologique, linguistiques... Une manière de cibler le codage sensori-moteur des lettres, qui est celui qui nous intéresse dans ce travail, est de les catégoriser en termes de complexité motrice. Cette classification consiste à mettre en évidence les régions dont l'activité diffère pendant la copie d'une lettre simple par rapport à une lettre complexe d'un point de vue moteur, indépendamment du système graphique. Les régions décodant la complexité sont donc impliquées dans les processus sensori-moteurs (planification motrice, exécution, contrôle et intégration sensorielle...) présents pendant la tâche d'écriture.

Nous avons donc effectué deux classifications : la première catégorisait si le participant était en train de copier une lettre simple ou complexe du point de vue moteur,

indépendamment du système graphique et la seconde catégorisait le système graphique, indépendamment de la complexité motrice des lettres.

Nous pouvons donc supposer que les régions qui catégorisaient correctement à la fois la complexité motrice et le système graphique étaient impliquées dans des processus sensori-moteurs communs mais codant différemment l'information des deux systèmes graphiques.

Point méthodologique : le MVPA

Le MVPA consiste à extraire la valeur de bêta de chaque voxel compris dans une région cérébrale pour chacun des essais. Ainsi, pour cette région, chaque essai est associé à un pattern de valeur bêta estimée. La classification consiste à entraîner et tester un algorithme à catégoriser correctement les essais en fonction d'une variable, sur la base de ces patterns d'activité. Supposons, pour simplifier, que la région soit composée de deux voxels, pouvant être représentés dans un espace en deux dimensions (x et y ; figure 55). Il est possible que la valeur moyennée des deux voxels ne montre pas de différence entre les deux systèmes graphiques, cependant il est possible que la copie des lettres arabes entraîne l'activation du voxel 1 mais pas du voxel 2 et inversement pour les lettres latines. L'algorithme parviendra alors à définir deux espaces correspondant aux deux catégories, délimité par une frontière de décision, ce qui lui permettra de catégoriser correctement des nouveaux essais. Au contraire, si cette région n'est pas impliquée différemment dans la copie des lettres issues des deux systèmes graphiques, l'algorithme ne sera pas capable de définir une frontière efficace et n'arrivera pas à catégoriser correctement de nouveaux essais. Pour pouvoir être catégorisés, les patterns d'activité neuronale doivent être suffisamment différents entre les conditions testées mais aussi assez semblables entre les essais au sein de chaque condition.

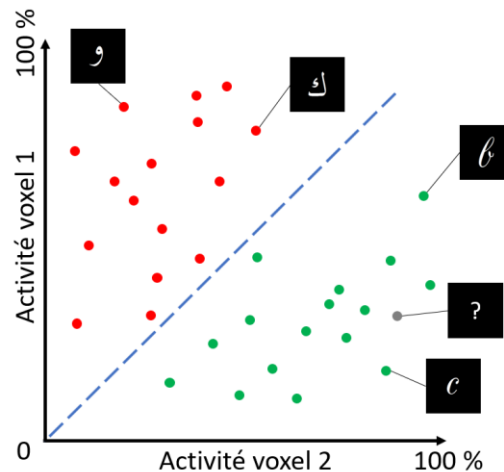


Figure 55 : Illustration d'une région à deux voxels présentant un pattern différent entre les lettres arabes et latines. Chaque point correspond à une lettre (arabe en rouge et latine en vert, test, en gris). La ligne bleu en pointillée correspond à frontière de décision calculée par l'algorithme.

Cette analyse se fait donc en deux temps : une phase d'apprentissage où l'algorithme va chercher à définir la frontière de décision à partir de nombreux exemplaires dans chaque catégorie et une phase de test où l'algorithme va catégoriser de nouveaux essais. Pour plus de détails sur cette analyse, voir Haxby et coll., 2001 ; Mur et coll., 2009 ; Norman et coll., 2006).

2.3.1. Méthode

2.3.1.1. Pré-traitement

Pour les analyses MVPA, nous avons utilisé le package « fMRIprep » (Esteban et coll., 2018a ; 2018b) pour prétraiter les images anatomiques et fonctionnelles. La procédure de prétraitement détaillée est disponible en annexe 12. Nous ne mentionnons ici que les principes de ces prétraitements. Les images anatomiques pondérées en T1 ont été prétraitées pour uniformiser les intensités, et ont ensuite été segmentées pour extraire les trois types de tissus (matière grise, matière blanche et liquide céphalo-rachidien). Pour chacune des 7 sessions fonctionnelles par sujet, le prétraitement suivant a été effectué. Les images fonctionnelles ont été corrigées pour les déformations du champ magnétique et réalignées. Nous avons également réalisé une correction « *slice timing* »

pour corriger le décalage temporel entre l'acquisition des différentes coupes pendant l'acquisition d'un volume. Nous n'avons pas effectué de normalisation vers un espace de référence, ni de lissage spatial des images.

2.3.1.2. Modélisation du signal : Estimation des coefficients betas de chaque évènement

Pour réaliser l'analyse de classification, il faut donc estimer une valeur beta pour chaque essai. Les sept sessions ont été analysées séparément, permettant d'obtenir une estimation de la valeur beta dans chaque voxel pour un total de 224 essais. Il est important d'avoir de nombreux exemplaires de chaque catégorie pour entraîner les algorithmes de manière optimale (Weaverdyck et coll., 2020).

Les analyses statistiques ont été réalisées sur les images fonctionnelles non lissées dans l'espace anatomique natif de chaque participant (Giordano et coll., 2018). Les participants ont effectué la tâche avec des mouvements de tête très limités (le déplacement moyen dans le cadre était de 0,13 mm, $sd = 0,07$), nous avons conservé l'ensemble des images pour l'analyse. Les analyses statistiques ont été effectuées selon le modèle linéaire général (Friston et coll., 1995), avec le logiciel SPM12 (<http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm>). Chaque session a été analysée indépendamment. Au premier niveau, chaque essai (indépendamment de la langue et de la complexité motrice) a été modélisé par un régresseur séparé, convolué avec la fonction de réponse hémodynamique canonique. Les évènements commençaient à l'apparition visuelle du stimulus et duraient jusqu'à la fin de l'écriture effective (voir dans la méthode de l'analyse univariée pour plus de précision).

Nous avons également ajouté un régresseur distinct pour les erreurs lorsque cela était nécessaire (voir également la méthode de l'analyse univariée). En ce qui concerne les prédicteurs de non-intérêt (confound regressors), nous avons inclus vingt-quatre régresseurs liés au mouvement (six séries temporelles de paramètres de réalignement classiques, leurs séries temporelles au carré et leurs dérivées temporelles). Le bruit

physiologique a été estimé par une analyse en composantes principales sur les données BOLD sur les masques de la substance blanche et du liquide céphalo-rachidien érodé, ce qui permettait d'isoler la variabilité du signal non lié aux variations BOLD réelles dans ces deux régions. Vingt-quatre composantes principales ont été utilisées comme régresseurs de nuisance dans le GLM (douze composantes pour chacune des deux régions, en utilisant la méthode « aCompCor » (Behzadi et coll., 2007).

Le GLM a été réalisé dans un masque individuel correspondant à la moyenne des images fonctionnelles recadrées sur l'image anatomique du participant, pour chaque session fonctionnelle. Le GLM permettait ainsi d'obtenir une carte d'estimation de la valeur beta pour chaque lettre par session, dans l'espace natif des participants.

2.3.1.3. Classification

La classification a été réalisée en utilisant un support vecteur machine linéaire implémenté avec « nilearn » (scikit-learn) en python 3.6.9 (Abraham et coll., 2014). Comme dit précédemment, deux classifications ont été réalisées. Nous avons donc entraîné un premier algorithme à catégoriser les lettres arabes et latines, indépendamment de leur complexité motrice. Nous avons ensuite entraîné un second algorithme à catégoriser les lettres simples et les lettres complexes, indépendamment du système graphique (figure 56).

La complexité motrice a été définie en fonction du nombre de traits et de la durée d'écriture, obtenus pendant l'étude préliminaire comportementale. Les lettres « simples » étaient écrites plus rapidement que les lettres « complexes » ($m=383.93$ ms et $m=636.87$ ms, respectivement et $t(25.5)=-7.53$, $p<0.001$) et avec moins de traits ($m=2.66$ et $m=5.05$, respectivement et $t(25.8)=-5.56$, $p<0.001$). Les deux catégories étaient composées chacune de 8 lettres arabes et 8 lettres latines.

Classification par complexité motrice

	Lettres latines	Lettres arabes
Lettres simples		
Lettres complexes		

Pour identifier les régions qui discriminaient les catégories de stimuli, nous avons réalisé une analyse sur l'ensemble du cerveau, dite en « *searchlight* » (Kriegeskorte et coll., 2006). La classification était réalisée dans une sphère de 10mm de rayon (soit 268 voxel) qui se déplaçait pour couvrir l'ensemble du cerveau (voir figure 57). La *searchlight* se déplaçait dans le masque individuel utilisé dans l'analyse de premier niveau. Pour chaque position de la *searchlight*, la valeur de catégorisation correcte de l'algorithme a été assimilée au voxel central de la sphère (Haynes, 2015).

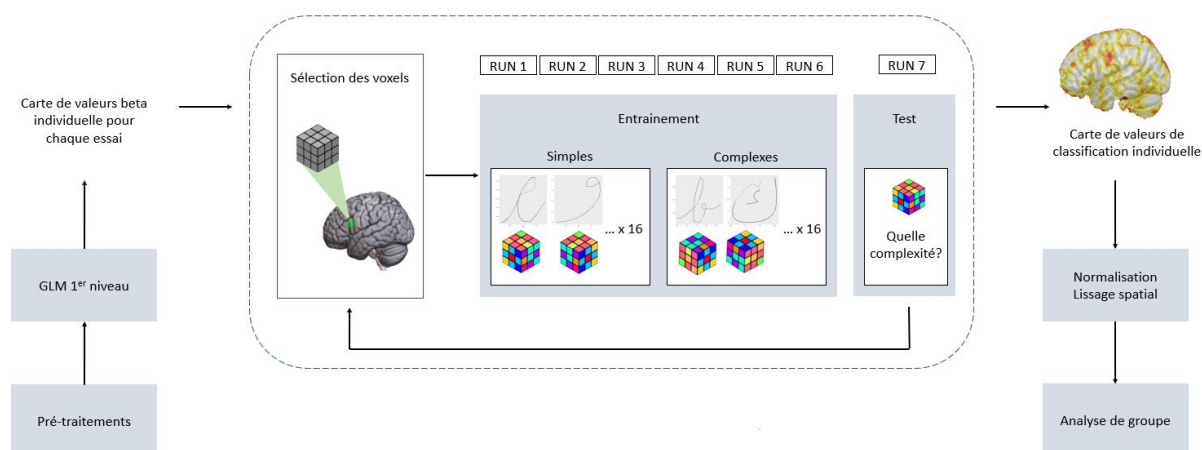


Figure 57 : Représentation schématique des étapes de l'analyse en MVPA. La classification se trouve dans l'encadré en pointillé. Pour chaque voxel compris dans une position de la searchlight, la valeur de beta est extraite pour chaque lettre écrite. Les algorithmes apprennent à distinguer des patterns communs entre les différents cubes de voxels, sur la base de la complexité motrice ou du système graphique. Cet apprentissage se fait sur 6 runs et est testé sur le 7^{ème}. Lorsque cela a été fait pour l'ensemble des positions possibles de la searchlight, nous obtenons une carte contenant le pourcentage de réussite lors du test des algorithmes. Enfin, la dernière étape est l'analyse de groupe.

Pour tester nos algorithmes, nous avons utilisé la validation croisée en *leave-one-session-out*, où l'entraînement du classifieur portait sur six runs et sa capacité à catégoriser était testée sur le septième. L'analyse a donc été réalisée 7 fois (chaque session était une fois la session test). Nous obtenons au final une carte par participant, donnant pour chaque voxel à l'intérieur du masque, la valeur moyenne de catégorisation sur l'ensemble des « plis ».

L'ensemble des sujets pour les deux conditions de classification a été traité en parallèle sur une architecture de calcul distribué en utilisant l'ordonnanceur « batch Slurm ». De plus, la fonction Python « NiLearn searchlight » a été exécutée pour chaque sujet en utilisant l'option *multi-threading* avec 10 cœurs de calcul. Nous remercions le Centre de Calcul Intensif d'Aix-Marseille (<https://mesocentre.univ-amu.fr/>) pour l'accès à ses ressources de calcul haute performance. Cette étape des traitements a été réalisée en collaboration avec les ingénieurs du DISC2 au LNC (Simon Moré et Jean-Luc Blanc) et avec Jean-Luc Anton (Centre IRMf, INT).

2.3.1.4. Analyse de groupe

Les cartes de classification de chaque participant ont été centrées sur 0 (au lieu de 50%, le hasard), puis normalisées dans l'espace du MNI à l'aide la fonction `antsApplyTransforms` de FSL, et lissées (FWHM = 5mm) avec la fonction `Smooth` de SPM. L'analyse au deuxième niveau a été réalisée avec SPM, en réalisant un t-test à un échantillon, pour chaque condition de classification indépendamment. Les résultats rapportés sont corrigés en q-FDR au niveau du cluster (Kriegeskorte et coll., 2006).

2.3.2. Résultats de l'analyse MVPA

Décodage de la complexité :

La complexité des caractères écrits a été décodée dans 4 régions (figure 58, panneau du bas ; tableau 27) : dans la SMA gauche, le gyrus post-central inférieur gauche, le gyrus précentral/le gyrus frontal inférieur gauche et la partie du lobe pariétal supérieur gauche. Ces régions, situées toutes à gauche, répondaient donc par des patterns différents selon la complexité des caractères produits.

Décodage du système graphique :

Le système graphique a été décodé de façon significative dans un réseau bilatéral, composé de sept larges régions (figure 58, panneau du haut ; tableau 27) : le gyrus post-central inférieur gauche, le gyrus occipito-temporal médian gauche, une région fronto-pariétale droite, étendue du gyrus frontal supérieur au gyrus post-central, des régions pariéto-occipitales droites, le lobe temporal droit, le lobe occipital droit et le lobe pariétal supérieur gauche.

Décodage de la complexité et du système graphique :

Deux régions décodaient donc les deux modalités testées : le gyrus post-central gauche (157 voxels, pic à [-54, -32, 32]) et le SPL gauche (49 voxels, pic à [-19, -64, 54], figure 58, panneau du milieu, partie droite).

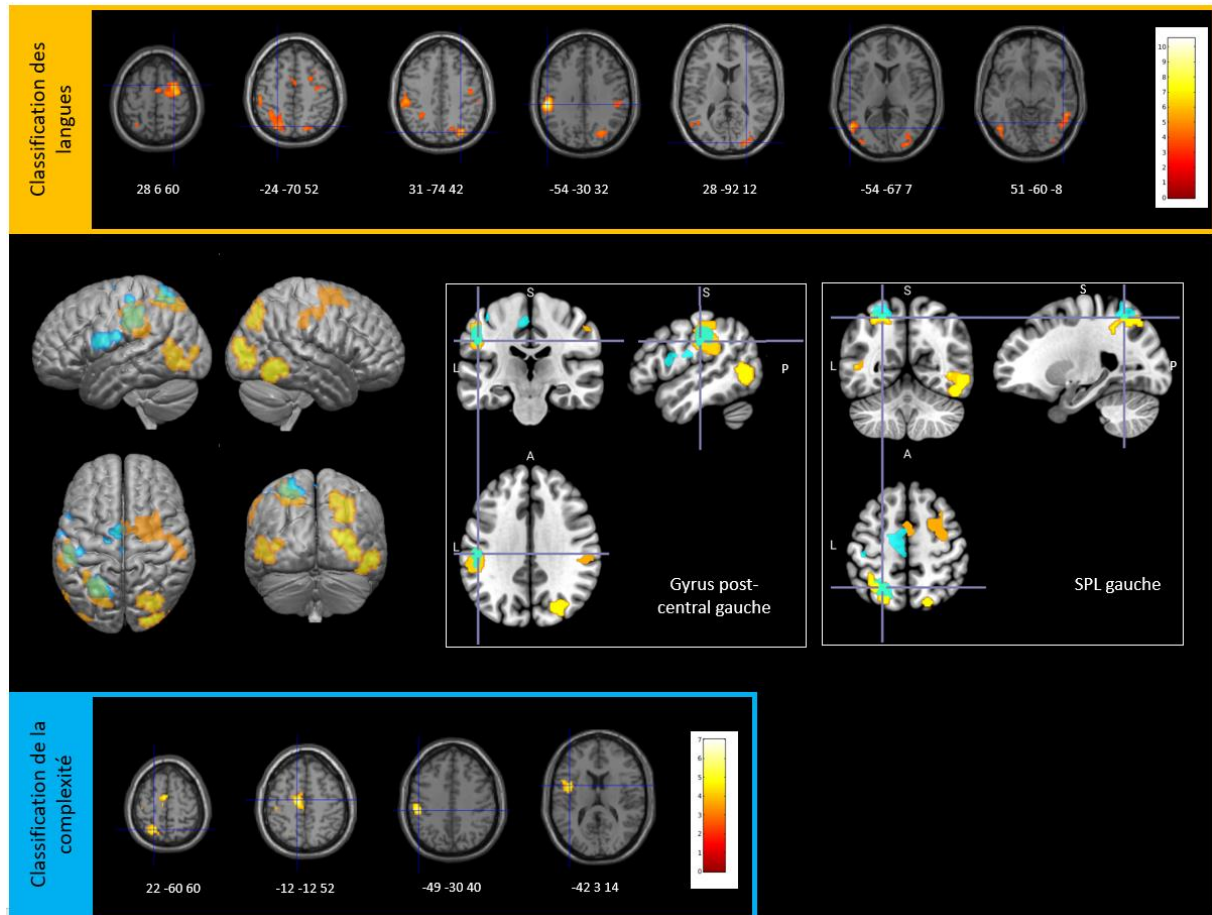


Figure 58 : Résultats de l'analyse en searchlight MVPA. Les régions discriminant les deux systèmes graphiques sont en orange et la complexité des lettres en bleu.

Classification	Région	x	y	z	(voxel)	t	q-FDR
Complexité motrice	SMA G	-12	-12	52	297	7	<0.001
	<i>SMA</i>				81%		
	<i>Cingulaire</i>				17%		
	postcentral inf G	-49	-30	40	196	6.3	0.001
	<i>pariétal inférieur</i>				51%		
	<i>supramarginal</i>				24%		
	<i>postcentral</i>				24%		
	Précentral/IFG G	-42	3	14	212	5.51	0.001
	<i>opercule rolandique</i>				29%		
	<i>précentral</i>				20%		
	<i>postcentral</i>				19%		
	<i>frontal inférieur</i>				19%		
	SPL G	-22	-60	60	164	5.35	0.002
	<i>pariétal supérieur</i>				89%		
	<i>pariétal inférieur</i>				5%		
Langue	postcentral inf G	-54	-30	32	497	10.54	0.001
	<i>supramarginal</i>				47%		
	<i>pariétal inférieur</i>				31%		
	<i>post-central inférieur</i>				16%		
	occipito-temporal milieu G	-54	-67	7	253	6.35	0.02
	<i>temporal milieu</i>				51%		
	<i>occipital milieu</i>				29%		
	<i>occipital inférieur</i>				13%		
	fronto-pariétal D	28	6	60	611	6.34	0.001
	<i>frontal supérieur</i>				46%		
	<i>précentral</i>				14%		
	<i>SMA</i>				11%		
	<i>supramarginal</i>				10%		
	<i>frontal moyen</i>				7%		
	<i>post-central</i>				5%		
	pariéto-occipital D	31	-74	42	249	5.95	0.02
	<i>occipital supérieur</i>				41%		
	<i>pariétal supérieur</i>				25%		
	<i>occipital milieu</i>				17%		
	<i>precunéus</i>				8%		
	temporal D	48	-60	-16	207	5.47	0.028
	<i>temporal inférieur</i>				66%		
	<i>temporal milieu</i>				18%		
	<i>gyrus fusiforme</i>				9%		
	occipital D	28	-92	12	216	5.26	0.02
	<i>occipital milieu</i>				64%		
	<i>occipital supérieur</i>				17%		
	<i>occipital inférieur</i>				14%		
	SPL G	-24	-70	52	315	4.93	0.012
	<i>pariétal supérieur</i>				63%		
	<i>pariétal inférieur</i>				31%		

Tableau 27 : Résultats de l'analyse en searchlight MVPA.

2.3.3. Discussion

L'analyse en pattern multivarié, visait à décrire les régions dont les patterns d'activité différaient pendant l'écriture de lettres arabes et latines. Contrairement à l'analyse univariée, elle a révélé qu'un large réseau bilatéral était capable de discriminer les deux systèmes graphiques pendant la tâche. Ce large réseau comprenait des régions bilatérales centrales/post-centrales, occipito-temporales et pariétales supérieures. Parmi ce réseau, deux régions situées dans l'hémisphère gauche discriminaient également la complexité motrice, le lobule pariétal supérieur et le gyrus post-central inférieur.

2.3.3.1. Un codage distinct des propriétés motrices et tactilo-kinesthésiques des deux systèmes graphiques ?

Nous avons trouvé que deux régions parvenaient à décoder à la fois le système graphique et la complexité motrice des lettres produites : le SPL et le gyrus post-central inférieur gauches.

Nous avons déjà mis en évidence l'implication différentielle du SPL gauche pour les lettres latines et arabes dans l'analyse univariée en région d'intérêt. Nous avons interprété cette différence par les traitements spatio-moteurs propres aux systèmes graphiques. L'analyse en pattern multivarié confirme un codage différent des deux systèmes graphiques dans le SPL. Ce résultat s'accorde avec l'observation de Kadmon-Harpaz et coll. (2014) qui ont montré qu'il était possible de décoder trois lettres latines entre elles indépendamment de leur taille, dans une partie du SPL gauche. Le SPL serait donc une région motrice de haut niveau, répondant de façon spécifique aux différents mouvements (Kadmon Harpaz et coll., 2014). Selon les auteurs, les populations neuronales ne coderaient pas pour une lettre précise, mais pour un ensemble des primitives du mouvement, incluant des vecteurs directionnels qui, additionnés dans la réponse hémodynamique, présenteraient un pattern unique pour chaque lettre. Nos résultats confirment le rôle crucial du SPL gauche dans l'implémentation motrice et montrent que deux jeux de caractères se différenciant par des séquences de mouvements différents peuvent être catégorisés dans cette région. Cette concordance entre résultats

uni- et multivariés souligne le rôle fondamental du SPL gauche dans la représentation motrice des lettres, et pourrait donc être en relation avec leurs trajectoires graphiques.

Une autre région, située dans le gyrus post-central inférieur gauche, entre le sillon central et l'IPL gauche, incluant le cortex somatosensoriel primaire, décodait également la complexité motrice et le système graphique. Pendant les déplacements de la main, le cortex somatosensoriel reçoit des informations proprioceptives venant des muscles, des tendons et des récepteurs articulaires, qui informent sur la position et les mouvements des membres mais également des informations tactiles issues des récepteurs cutanées (Danna & Velay, 2015).

Les retours somatosensoriels n'ont pas été beaucoup étudiés dans le cadre de l'écriture, cependant dans une approche multimodale de la représentation des caractères, on peut supposer que chaque lettre est également codée en mémoire selon les retours somatosensoriels qu'elle engendre. L'existence d'un retour proprioceptif propre à chaque lettre peut être appuyée par deux études dans lesquelles, en faisant vibrer les tendons des muscles impliqués dans les mouvements du poignet, les auteurs ont induit une illusion proprioceptive, où les participants avaient l'impression de dessiner différentes formes géométriques ou des lettres (Roll & Gilhodes, 1995 ; Roll et coll., 2009). Cela suggère que les afférences proprioceptives peuvent activer une représentation de la lettre. La similarité entre ces codes proprioceptifs pourrait être plus forte pour des lettres venant d'un même système graphique (par exemple, les lettres dont les courbes sont tracées dans le sens horaire ou anti-horaire) et permettre un décodage basé sur ces représentations proprioceptives.

Le rôle que peuvent jouer les récepteurs à la pression en contact avec le stylo n'est pas encore connu, mais une meilleure perception tactile serait associée à une meilleure qualité d'écriture chez les enfants (Yu et coll., 2012) et une suppression de ces récepteurs entrainerait une moins bonne production graphique (Danna et coll., 2021). Existe-t-il des modifications des retours tactiles en fonction de la direction d'écriture ? La pression exercée sur les récepteurs localisés dans la surface des doigts en contact avec le stylo lors des mouvements de flexion/extension est-elle la même lorsque l'on « tire » le stylo vers la droite ou lorsqu'on le « pousse » vers la gauche ? Cette interprétation est spéculative et nécessiterait d'être testée directement, en utilisant notamment des stylos à capteur de force (voir Danna et coll., 2021) chez des bigraphes écrivant les deux alphabets mais aussi

chez des monographes. Des données récentes montrent par exemple que la tenue du stylo, évaluée par l'orientation du stylo relativement à l'axe principal de la feuille, est différente lorsque des bigraphes arabe/français écrivent des mots en arabe et en français (Younes-Harb et coll., in prep.).

De manière générale, les différences dans les directions de tracé des traits composant les lettres, et dans les différentes composantes de l'écriture issues du système arabe et latin, pourraient se traduire au cours de l'écriture par des séquences spécifiques de changements somatosensoriels qui, en retour, pourraient entraîner une catégorisation neurale spécifique de ces lettres. Cependant, le rôle des informations somatosensorielles pendant l'écriture reste à étudier plus largement, en particulier dans le cas du bigraphisme arabe/latin dont la direction d'écriture et de lecture est opposée.

Alternativement, l'organisation différente, dans les deux systèmes graphiques, de l'activité neuronale du gyrus post-central inférieur gauche en fonction de la complexité des lettres pourrait également être liée à un codage prédictif. D'après Wolpert et Ghahramani, (2000), les retours sensoriels des différents mouvements ne seraient pas stockés en mémoire à long terme, car ils dépendent de trop nombreux facteurs et entraîneraient un nombre trop important de combinaisons à maintenir en mémoire. Cependant, les conséquences sensorielles d'une action seraient prédites pendant la préparation du mouvement, à partir d'une copie de la commande motrice, envoyée aux cortex sensoriels impliqués dans la tâche (Wolpert et coll., 1995, 2011 ; Wolpert & Ghahramani, 2000). Dans l'écriture de lettres, une copie du programme moteur spécifique à la lettre serait donc envoyée au cortex somatosensoriel contralatéral à la main tenant le stylo, prête à réaliser l'action. Le système génèrerait un ensemble de prédictions proprioceptives, qui serait donc spécifique au patron moteur sélectionné. Il est donc possible que le codage prédictif soit plus similaire pour les lettres d'un même système graphique, qui partagent des retours sensoriels plus proches.

Une limite à ces interprétations est que le pic du cluster dans le cortex somatosensoriel était légèrement plus ventral que la région dévolue à la localisation de la main : elle serait plutôt située au niveau de la représentation du visage, selon l'organisation somatotopique

du cortex somatosensoriel. La discrimination des deux systèmes graphiques dans cette région pourrait donc être due à sa représentation phonologique (Planton et coll., 2013 ; Purcell et coll., 2011a ; Sugihara et coll., 2006). La discrimination des deux systèmes graphiques pourrait donc être faite à partir de traitements phonologiques de la lettre et différents pour les deux systèmes graphiques. Comme nous le verrons en discussion générale, certaines méthodes d'analyse récentes peuvent permettre de répondre à cette question.

2.3.3.2. Un contrôle moteur et des processus attentionnels différents entre les deux systèmes graphiques ?

L'analyse univariée a montré que les régions motrices, prémotrices et l'aire motrice supplémentaire (SMA) de l'hémisphère gauche présentaient une réponse liée à la composante motrice de l'écriture mais ne codaient pas différemment les systèmes graphiques. Dans l'analyse en pattern multivarié, une région du cortex moteur primaire, située au niveau de la représentation de la main, ainsi qu'une région plus étendue dans la SMA gauche, discriminaient les lettres complexes des lettres simples. Globalement, le réseau discriminant la complexité était restreint, ce qui peut être expliqué parce que nous avons arbitrairement classé les stimuli en deux catégories, simples et complexes alors que la complexité motrice est une variable continue. Il est à noter que les lettres simples d'un point de vue moteur étaient aussi souvent plus simples visuellement (elles comportaient moins d'éléments). Il se peut que la catégorisation soit aussi basée en partie sur cette complexité visuelle, mais cette interprétation est peu probable. En effet, la localisation des régions parvenant à catégoriser les lettres simples et complexes, et l'absence de catégorisation dans les régions précoces (primaires) du système visuel, suggérant un décodage basé sur des aspects sensori-moteurs plutôt que visuels.

Le cortex moteur primaire (M1), prémoteur et la SMA gauche ne présentaient pas de sensibilité au système graphique. Cette absence de discrimination dans M1 est étonnante car Kadmon-Harpaz et coll. (2014) ont montré que cette région codait, comme le SPL, une représentation spécifique des primitives du mouvement, permettant de catégoriser les

lettres produites. La complexité motrice, catégorisée de façon significative dans cette région, qui différait au sein des lettres arabes entre elles et des lettres latines entre elles a pu minimiser la catégorisation des deux systèmes graphiques. De la même façon, il n'y a pas de codage du système graphique dans le PMd gauche, bien qu'une spécialisation fonctionnelle pour une catégorie de caractères ait déjà été montrée (Longcamp et coll., 2014). En revanche et de façon intéressante, le PMd droit et la pré-SMA droite discriminaient le système graphique.

Pour plusieurs auteurs, les activations des régions du PMd droit pendant l'écriture pourraient être liées à l'inhibition des régions motrices homologues, c'est-à-dire l'inhibition des mouvements de la main non dominante (Chettouf et coll., 2020 ; Gerloff, 1998 ; Planton et coll., 2017 ; Roux et coll., 2009). Il est donc possible que ces processus soient sollicités différemment selon le système graphique, bien que cette interprétation nécessiterait plus d'investigation.

La SMA est connue pour jouer un rôle dans la planification et le contrôle d'action, notamment de séquences motrices complexes (Gerloff, 1997 ; Nachev et coll., 2008). Cette région est donc impliquée dans l'écriture qui est une séquence motrice complexe, mais également dans la production de langage oral (Alario et coll., 2006). Dans notre analyse, la pré-SMA droite discriminait le système graphique. Il existerait une organisation graduelle entre la SMA et la pré-SMA : la pré-SMA est plus souvent impliquée dans les situations plus complexes, ou de plus hauts niveaux cognitifs que la SMA, qui est plus directement liée à l'exécution motrice (Alario et coll., 2006 ; Nachev et coll., 2008). La pré-SMA est également impliquée dans des situations où on demande d'imaginer qu'on est en train d'écrire (Kato et coll., 1999), ou d'exécuter des séquences de mouvements simples des doigts (Deiber et coll., 1998). Puisque ces situations nécessitent d'imaginer les mouvements, mais sans les réaliser, elle suppose des processus inhibiteurs de l'action dans lesquels la pré-SMA pourrait jouer un rôle. Bien que ces interprétations restent spéculatives, il semble y avoir un accord pour reconnaître son implication plus largement dans le contrôle des actions.

Au-delà du PMd et de la pré-SMA, la catégorisation des deux systèmes graphiques est aussi réalisée dans le lobe pariétal postérieur/supérieur de l'hémisphère droit. Ce réseau

constitué du cortex pariétal postérieur et du cortex frontal rappelle aussi le réseau dorsal de l'attention (Caspers et coll., 2012). La voie dorsale fronto-pariétale comprend en particulier l'IPS/SPL et les régions oculomotrices frontales (*'frontal eye field'*, ou FEF, situées dans le gyrus précentral, très proche de la région spécifique de l'écriture dans le PMd). Ce réseau est impliqué dans l'allocation volontaire des processus attentionnels (Caspers et coll., 2012 ; Vossel et coll., 2014) et il envoie des informations « top-down » vers les cortex sensoriels (Rajan et coll., 2021).

Une discrimination du système graphique dans ce réseau attentionnel pourrait suggérer que les réserves attentionnelles ne sont pas allouées de la même façon quand on écrit des caractères arabes et latins. Comme nous l'avons discuté dans l'analyse univariée, certaines caractéristiques spécifiques de chacun des alphabets, comme le fait qu'il y a davantage de levers (topocinèses) dans les lettres arabes que dans les lettres latines, ont pu entraîner un contrôle attentionnel différent.

Enfin, le cortex prémoteur ventral/le gyrus frontal inférieur (PMv/IFG) gauche discrimine la complexité des lettres, mais pas le système graphique. Selon certains auteurs, cette région pourrait être impliquée dans la planification des mouvements (Longcamp et coll., 2019; Schubotz & von Cramon, 2001). D'ailleurs, l'IFG présente une connectivité fonctionnelle avec le PMd (Yang et coll., 2019) et M1 (Planton & Kandel, 2016). Le PMv/IFG est impliqué dans des tâches d'écriture mais également dans d'autres tâches linguistiques comme la perception et la production de parole (Longcamp et coll., 2019). Au cours de l'écriture, il pourrait aussi être impliqué dans des processus orthographiques (Planton et coll., 2013 ; Purcell et coll., 2011a ; Rapp & Dufor, 2011) ou phonologiques (Omura et coll., 2004 ; Paulesu et coll., 2000 ; Wu et coll., 2012). Mais, dans notre étude limitée aux caractères isolés, la catégorisation de la complexité ne correspond pas à priori à des différences articulatoires ou linguistiques, même si ce point reste à vérifier. Plus généralement, pour (Fedorenko et coll., 2011) cette région aurait un rôle dans la réalisation de tâches complexes, ce qui pourrait expliquer la catégorisation des lettres simples et complexes.

2.3.3.3. Régions ventrales occipito temporales et codage du système graphique

Une classification correcte des deux systèmes graphiques a été réalisée dans les régions occipitales latérales et occipito-temporales ventrales bilatérales, de façon bilatérale : quelle peut en être la raison ?

Familiarité visuelle et détails dans la configuration visuelle

Tout d'abord, ce résultat corrobore celui déjà obtenu dans l'analyse univariée, dans laquelle nous avons trouvé une implication plus forte du cortex visuel V2 droit pour les lettres latines que pour les lettres arabes. Nous avons interprété l'augmentation de l'activité dans cette région comme la conséquence d'une moindre automaticité de la reconnaissance des lettres latines, qui étaient présentées sous une forme cursive dans notre étude (Qiao et coll., 2010). Cette même raison peut être invoquée également pour expliquer la discrimination entre les deux jeux de caractères observée dans l'analyse multivariée, dans les régions appartenant à la voie visuelle ventrale (incluant en partie V2). Plus largement, la classification des lettres pourrait venir de différences perceptives entre les deux jeux de caractères. La discrimination du système graphique dans les régions visuelles précoces pourrait venir de différences spécifiques dans les composantes de la forme visuelle des lettres latines et arabes (comme le fait qu'il y ait plus de lettres contenant des points dans l'alphabet arabe) ou de la localisation de ces détails (en arabe, les points peuvent se trouver sous les lettres, ce qui n'existe pas dans l'alphabet latin). Au-delà de ces aspects statiques dans la perception, les régions de la voie visuelle ventrale reçoivent également des informations « top-down » des niveaux supérieurs de traitement (Price & Devlin, 2011). En fonction du contexte et de l'expérience du sujet, des prédictions visuelles internes vont être faites et envoyées aux niveaux inférieurs de traitement. Dans cette conception, la vision des lettres à copier puis leur production écrite pourraient générer des prédictions visuelles dynamiques, et expliquer un codage différent des deux systèmes graphiques dans le système visuel et en particulier dans l'aire V5/MT (Kourtzi & Kanwisher, 2000).

Gyrus fusiforme : traitements visuels de haut niveau

Au-delà de régions visuelles secondaires, les deux systèmes graphiques étaient également décodés dans la célèbre VWFA (Cohen & Dehaene, 2004 ; Dehaene et coll., 2010), et dans son homologue à droite. Certains auteurs ont cherché à savoir si, dans une tâche de lecture de mots, il y aurait une spécificité à un système graphique donné au sein du gyrus fusiforme gauche. Les résultats des études réalisées en analyse univariée mettent en évidence l'activation d'une même région, pour des systèmes graphiques très différents (Bai et coll., 2011 chinois/coréen). Cependant, des études en analyse multivariée (MVPA) comme celle de Xu et coll. (2017) montrent une catégorisation possible des systèmes graphiques dans cette région (Xu et coll., 2017 chinois/anglais). Ces études ont comparé des systèmes graphiques très différents l'un de l'autre mais nos résultats confirment cette catégorisation entre deux systèmes plus proches, car tous deux alphabétiques, dans cette région. Le gyrus fusiforme coderait pour la représentation abstraite des lettres, indépendamment de leur forme visuelle (Rothlein & Rapp, 2014) et il est envisageable que les représentations de l'identité des lettres françaises et arabes soient codées différemment dans cette région.

On peut émettre l'hypothèse que le sens d'écriture associé aux lettres arabes et latines pourrait être traité dans le gyrus fusiforme gauche comme une information « top-down » et permettrait la catégorisation des deux systèmes graphiques dans cette région. Longcamp et coll. (2011) ont montré que le FuG postérieur gauche répondait plus fortement aux lettres latines présentées en écriture manuscrite qu'en caractère d'imprimerie, laissant supposer qu'il pourrait être sensible à des informations motrices (le PMd était également plus activé). D'autres études ont montré une influence de la motricité sur l'activité de ces régions pendant la perception de lettres suggérant des feedbacks depuis les régions motrices (James & Atwood, 2009 ; Longcamp et coll., 2008). Une augmentation de la connectivité entre le gyrus fusiforme gauche et les régions motrices a été montrée chez des enfants apprenant à tracer des lettres à la main (Vinci-Booher et coll., 2016).

En plus de son homologue gauche, le gyrus fusiforme droit discriminait également le système graphique. Cette région n'est pas identifiée comme participant au traitement des mots écrits dans l'alphabet latin, ni en lecture ni en production, cependant elle a été rapportée dans des études sur la lecture du chinois (Bolger et coll., 2005; Cao et coll., 2010, 2013; Perfetti et coll., 2013; Szwed et coll., 2014; Tan et coll., 2005). Dans une étude récente, Yang et coll. (2019) confirment l'implication du fusiforme de façon bilatérale dans une tâche d'écriture du chinois par rapport à une situation contrôle moteur (tracer des cercles). Comme nous l'avons vu pour le lobe pariétal supérieur droit, certains auteurs ont proposé que cette région serait également spécifiquement impliquée dans le traitement du chinois, notamment à cause de traitements visuospatiaux complexes spécifiques de ces idéogrammes (Nelson et coll., 2009; Perfetti et coll., 2013; Perfetti et coll., 2007). Il se peut que le sens de progression opposé de l'écriture et de la lecture des systèmes graphiques arabe et latin ait participé à la discrimination des deux systèmes graphiques.

Conclusion :

L'analyse en pattern multivarié a mis en évidence que, pendant l'écriture des lettres réalisée par des adultes bigraphes, l'activité neuronale d'un large réseau est différente selon que les lettres écrites appartiennent à l'alphabet arabe ou latin. Les régions post-centrales inférieures et pariétales supérieures gauches seraient impliquées différemment dans le traitement sensori-moteur des deux systèmes graphiques, prédictif (dans la simulation de modèles internes sensoriels) et rétroactif (dans l'intégration des retours sensoriel). Les régions frontales et pariétales supérieures à droite pourraient être impliquées dans le contrôle attentionnel qui était peut-être différent pour écrire les deux types de lettres. Enfin, les régions occipito-temporales bilatérales pourraient être sensibles aux propriétés visuelles des lettres, avec un éventuel contrôle 'top-down' des mouvements.

3. Discussion générale

Notre compréhension des corrélats comportementaux et neuraux de l'écriture est principalement basée sur des études utilisant l'alphabet latin. Cependant, la question de savoir si l'organisation des représentations motrices et du réseau cérébral liés à l'écriture est la même pour tous les systèmes graphiques reste ouverte. Dans cette étude, nous confirmons le recrutement d'un réseau pariéto-central gauche et du cervelet droit dans l'écriture de caractères arabes et latins, soutenant l'existence d'un système neuronal universel, ou du moins partagé par les systèmes d'écriture alphabétique. Cependant, la plus forte implication des cortex pariétaux et du cervelet dans l'écriture des lettres arabes que dans celle des lettres latines, ainsi que la discrimination des deux alphabets dans un large réseau bilatéral suggèrent que les caractéristiques particulières de chaque système graphique conduisent à une représentation motrice différente au sein des régions cérébrales. Les mouvements, très automatisés et extrêmement rapides, qui permettent d'écrire les caractères alphabétiques seraient codés de façon différenciée dans certaines régions cérébrales, selon leurs caractéristiques sensori-motrices.

L'écriture des lettres engage un réseau multimodalitaire correspondant aux différentes représentations des lettres. L'utilisation de lettres isolées, arabes et latines, au lieu de mots nous a permis de minimiser les influences linguistiques, de complexité visuelle, de mapping phonologique et de maximiser les différences sensori-motrices. Cependant, les interprétations rapportées dans cette étude, principalement sensori-motrice et visuelle, nécessiteraient l'appui d'une nouvelle analyse pour confirmer l'aspect moteur, visuel, ou encore phonologique des activations observées. Une analyse de ces données en RSA (*Representational Similarity Analysis*) pourrait apporter des informations importantes. Pour une région (pouvant être une position de la *searchlight*), le pattern d'activation des voxels pour chaque essai comparé deux à deux avec chacun des autres essais, permettant d'obtenir une matrice de dissimilarité représentationnelle. Cette matrice indiquerait jusqu'à quel point deux essais ont entraîné un pattern d'activation similaire/dissimilaire dans la région étudiée. Cette matrice représentationnelle pourrait ensuite être comparée à différentes matrices théoriques, représentant la similarité entre des essais selon un certain aspect (Kriegeskorte, 2008). Dans une tâche de perception de lettres latines chez

des monographes anglais, Rothlein et Rapp (2014) ont comparé l'activité cérébrale générée avec différentes matrices de similarité/dissimilarité visuelle, motrice, phonologique (similarité perceptive entre le nom des lettres) et l'identité de la lettre (similarité 100% pour deux allographes d'une même lettre et 0% pour de lettres différentes). Ainsi les auteurs ont pu montrer que la similarité motrice des lettres latines était codée dans le lobe pariétal, autour du sillon intrapariétal gauche, proche de la région du SPL que nous avons observé coder pour le système graphique et la complexité motrice. Dans leur étude, la région post-centrale inférieure gauche n'était sensible à aucune des matrices de dissimilarité. Cela peut suggérer que la discrimination obtenue dans notre étude peut venir soit d'une spécificité de notre tâche d'écriture, soit du fait que les participants de notre étude étaient bigraphes, soit pour les deux raisons.

Les limites de cette étude

Les participants de cette étude ont été recrutés en France ; ainsi, les fréquences quotidiennes d'utilisation des deux systèmes graphiques n'étaient pas les mêmes. Les participants écrivaient plus souvent en français qu'en arabe, et certaines des différences comportementales et neurales observées pourraient provenir de cette différence. Afin de mieux contrôler ce facteur, nous avons effectué des analyses complémentaires dans lesquelles nous avons pu vérifier que les activations préférentielles pour l'arabe et le latin n'étaient pas corrélées aux différences individuelles entre les deux langues en termes de fréquence d'utilisation. La tâche (copier des lettres isolées) était très facile et, même s'il y avait une tendance à davantage utiliser le français, cela n'a probablement pas eu d'effet en termes de connaissance des caractères alphabétiques. En outre, les participants ont été entraînés à cette tâche avant l'expérience proprement dite. Enfin, les résultats ont montré qu'ils mettaient le même temps à écrire les lettres latines ou arabes sélectionnées, ce qui suggère que les deux alphabets étaient de difficulté égale.

Malgré la simplicité apparente de la tâche de copie de lettres, cette tâche met en jeu une série de processus divers : reconnaissance visuelle, préparation, exécution et contrôle du mouvement... Malheureusement, la résolution temporelle de l'IRM ne permet pas de dissocier ces différents processus. L'IRM peut toutefois permettre d'isoler certains

d'entre-eux en utilisant une situation contrôle adaptée. La diversité des situations de contrôle au sein des études (voir les méta-analyse de Planton (2013) et Purcell (2011a)) montre la multitude de composantes impliquées dans l'écriture.

Enfin, le choix de la police type « manuscrite » pour les lettres françaises a complexifié l'interprétation des résultats, mais ne suggère pas, dans l'analyse en univarié, une difficulté beaucoup plus forte (régions restreintes aux régions visuelles précoces). Cela confirme la sensibilité du système visuel, malgré une reconnaissance automatique des caractères aux allographes des lettres.

Conclusion

Compte tenu de la place très importante que prennent la lecture et l'écriture dans nos sociétés, il est fort probable que ces pratiques très régulières depuis la petite enfance agissent sur nos traitements perceptifs et cognitifs. Il a été montré par exemple que le sens d'écriture et de lecture opposé entre des utilisateurs des alphabet latin et arabe, oriente significativement et à leur insu, la perception de l'espace, l'organisation des activités visuospatiales complexes et même certains choix esthétiques et sociaux (Maass et coll., 2014 ; Schubert & Maass, 2011). Il est permis de penser que ces différences comportementales s'appuient sur une organisation fonctionnelle du cerveau différente. Cela pourrait être étudié de manière plus précise chez les sujets bigraphes qui sont confrontés aux deux directions d'écriture.

Perspectives et conclusions

Le travail expérimental mené pendant cette thèse confirme le rôle de la sensorimotricité pendant l'apprentissage et dans les représentations de l'écrit. Il ouvre également de nombreuses pistes de recherche, tant sur la question de l'apprentissage numérique, de l'apprentissage de l'arabe, que de la question de la bigraphie.

Initialement, le projet prévoyait de suivre le développement cognitif et neuronal de l'apprentissage de la lecture et de l'écriture au collège dans les deux groupes d'élèves en IRMf. Les conditions ne l'ont pas permis, et la question reste donc très ouverte : c'est la perspective la plus immédiate de cette thèse.

1. Résumé des résultats

Notre étude longitudinale au collège a confirmé un effet du mode d'écriture sur l'apprentissage des lettres arabes. Les résultats montrent un avantage de l'écriture manuscrite pour les connaissances liées à l'orientation des lettres et à l'association allographique. De plus, nous avons montré que le clavier pouvait présenter un avantage à court terme pour mémoriser les lettres mais que cet avantage ne se maintenait pas sur le long terme.

Notre seconde étude chez le bigraphe expert a montré que les lettres arabes et latines se distinguaient effectivement sur le plan graphomoteur. Du point de vue cérébral, nous avons montré que le réseau pariéto-frontal gauche typiquement impliqué dans la production d'écriture était retrouvé pendant la copie de lettres chez les bigraphes arabe/français. Cependant, les lettres arabes engageaient plus fortement que les lettres latines les régions pariétales supérieures bilatérales et cérébelleuse droite et un ensemble de régions discriminait les deux systèmes graphiques.

2. Quel effet du mode d'écriture sur des traitements de plus haut niveau cognitif que les lettres ?

L'étude longitudinale du projet ARABESC avait été pensée pour dépasser le stade précoce de la littératie et étudier si l'influence du mode d'écriture sur l'apprentissage des lettres qui avait déjà été observée par certains auteurs se répercuterait sur des processus de plus haut niveau impliqués dans le traitement de l'écrit comme la rédaction ou la mémorisation de contenus (mots, idées, notions...).

Plusieurs études se sont déjà intéressées à la qualité rédactionnelle et la qualité de l'orthographe, lorsque l'écriture se faisait à la main ou au clavier. Bien que ces études soient réalisées chez des élèves maîtrisant l'écriture manuscrite, elles peuvent apporter des informations. Par exemple, chez des enfants de 10-12 ans, la qualité de la rédaction écrite était meilleure à la main qu'au clavier (Connelly et coll., 2007). En outre, les enfants écrivaient plus rapidement à la main qu'au clavier (dans une tâche de copie d'une phrase). Selon les auteurs, pendant la production de texte, le niveau plus faible au clavier qu'à la main entraînerait une charge cognitive supplémentaire, laissant moins de ressources pour assurer une bonne qualité de rédaction. En effet, plusieurs études montrent que la qualité rédactionnelle ou de l'orthographe est dépendante des compétences graphomotrices et dactylographiques de bas niveau (appelées quelquefois « *transcription skills* » ; Alstad et coll., 2015 ; Berninger et coll., 2009 ; Christensen, 2004 ; Connelly et coll., 2007 ; Peake et coll., 2017). Une étude très intéressante de Spilling et coll. (2021) a établi que chez des enfants norvégiens ayant eu un apprentissage manuscrit et dactylographique combiné pendant les trois premiers mois de l'école (6 ans), ni le mode d'écriture utilisé pendant les tests, ni le niveau d'écriture ne semblaient influencer la qualité de la rédaction d'une histoire courte. Cela suggère que lorsque l'enfant utilise les deux modalités d'écriture en situation scolaire, sa qualité rédactionnelle n'est pas affectée par le mode d'écriture. Cette étude ouvre la perspective de combiner les deux apprentissages. Cependant, de nombreuses questions se posent comme l'évolution de ces compétences quand les deux modes d'écriture sont pratiqués sur de longues périodes.

D'autres auteurs ont étudié le rôle que pouvait jouer l'écriture manuscrite pendant l'apprentissage et la mémorisation de listes de mots ou de pseudo-mots et donnent des résultats contrastés (Mangen et coll., 2015 ; Ouellette & Tims, 2014). Un résultat intéressant de l'étude de Ouellette et coll. est cependant que la mémorisation des pseudo-mots dépendait fortement du niveau d'expertise au clavier (Ouellette, 2014 et Tims, 2014).

Dans l'ensemble, ces résultats suggèrent que ce n'est pas tant le mode d'écriture qui impacte les processus de plus haut niveau, mais la maîtrise de l'outil utilisé.

A un niveau plus complexe que des listes de mots ou de pseudo-mots, Mueller & Oppenheimer (2014) ont montré un avantage du manuscrit par rapport au clavier sur l'apprentissage d'un cours : les étudiants ayant pris leurs notes à la main se rappelaient mieux des concepts vus en cours. Ce résultat a été expliqué par des différences dans l'encodage des informations, qui se fait par pure transcription au clavier tandis que l'information est reformulée en écriture manuscrite. Cet effet semble par contre restreint à certaines situations : par exemple (Horwitz, (2017), ne l'ont pas répliqué dans le contexte de l'apprentissage à partir d'un manuel tandis que Frangou et ses collaborateurs l'ont répliqué à plusieurs reprises dans le contexte de la mémorisation d'une histoire, à la fois chez des adultes (Frangou et coll., 2018) et chez des enfants de 11 à 16 ans (Frangou et coll., 2019).

La question du meilleur outil pour écrire et de l'influence de la maîtrise de cet outil sur des traitements cognitifs de plus haut niveau est donc plus que jamais importante à aborder : en effet, la plupart des études citées s'intéressent à des élèves qui maîtrisent déjà plus ou moins bien les deux modes d'écriture, mais ce paramètre n'est pas contrôlé. Il serait particulièrement pertinent de tester ces compétences de haut niveau dans un contexte comme celui de notre étude où un seul mode d'écriture est enseigné et maîtrisé.

3. Quel apprentissage du clavier chez les enfants aujourd'hui ?

En quoi les modèles de la frappe, décrits par Rumelhart (1982) chez les experts dactylographes des années 80, et de Logan (2011), plus récent mais toujours chez l'adulte, ont à voir avec la façon de taper des enfants d'aujourd'hui ? De nombreuses questions pourraient être posées, par exemple, le nombre de doigts impliqués dans la frappe augmente-t-il en fonction de l'âge ?, ou de la fréquence d'utilisation du clavier ?, ou du niveau d'expertise au clavier et dans le système graphique ? Le clavier n'étant pas enseigné de façon formelle, la variable confondue de l'âge que l'on observe dans les études développementales de l'écriture manuscrite devrait être contrôlable, pour peu que le groupe d'enfants étudié présente une variabilité suffisante dans l'utilisation du clavier. De plus, ce domaine manque d'études à grande échelle sur le développement de cette compétence et de telles études seraient essentielles pour mieux comprendre comment cette nouvelle méthode d'écriture prend place chez les enfants. Une étude très récente à grande échelle (Pinet et coll., in press) a mesuré en ligne, les compétences de frappe chez plus de 1300 adultes étudiants. Une étude similaire chez l'enfant serait très intéressante. Mieux comprendre comment les enfants apprennent et automatisent leurs compétences en frappe pourrait permettre de mieux optimiser les apprentissages dans les études comme celle que nous avons réalisée au collège, et de mieux comprendre si les enfants ont effectivement acquis ces compétences à la fin des apprentissages. Par ailleurs, il serait important d'évaluer si l'acquisition de la frappe au clavier interfère avec l'acquisition de l'écriture manuscrite. Nous pourrions envisager que cette étude se fasse sur tablette numérique, avec le clavier tactile, et qu'elle comprenne également une part de copie manuscrite avec un stylet. La question de la précision des outils de mesure se pose cependant : les limites dans les résolutions temporelles des tablettes actuellement disponibles ne permettent souvent pas de suivre le mouvement de l'écriture correctement. Dans notre étude par exemple, nous n'avons pas pu mesurer les temps inter-frappes, mais ce serait une perspective importante afin de pouvoir corrélérer réellement le degré d'automatisation de la frappe au clavier des participants avec leur niveau de connaissance des lettres après les apprentissages, et mesurer les interférences possibles entre écriture manuscrite et dactylographique.

4. Mieux comprendre la bigraphie arabe/français et l'influence du numérique

Nous avons montré que les bigraphes arabe/français n'écrivaient pas les deux alphabets de la même façon, d'un point de vue comportemental et ne mettaient pas en jeu les mêmes réseaux cérébraux. Mais est-ce que les bigraphes écrivent comme les monographes ? Est-ce que la connaissance des deux systèmes graphiques va impacter la manière dont ils produisent l'écriture ? Du point de vue comportemental une étude récente de Younes-Harb et coll. (en préparation) pose cette question et constate que l'arabe est écrit de la même façon par les monographes arabes et les bigraphes arabe/français, mais que ces bigraphes n'écrivent pas le français comme des monographes français (Younes et coll., in prep). Cela suggère que les deux systèmes interfèrent chez les bigraphes, créant l'équivalent d'un « accent » à l'écrit. Du point de vue cérébral, si nous répliquions notre étude IRMf chez des monographes en arabe ou en français, nous pourrions donc nous attendre à un réseau similaire pendant l'écriture de l'arabe chez le bigraphe et le monographe mais des particularités pourraient apparaître en français lorsque les bigraphes sont comparés avec un groupe de monographes français. Il serait également intéressant de comparer directement un groupe de monographes en arabe et un groupe de monographes en français pour voir si nous retrouvons les mêmes différences entre des individus écrivant uniquement un des deux systèmes graphiques que celles que nous avons observées chez les bigraphes qui écrivent les deux. En effet, il est envisageable que la coexistence des deux systèmes au sein d'une même personne bigraphe, en fasse une personne singulière qui ne traiterait cognitivement et cérébralement aucune des langues comme le font les monographes.

Par ailleurs, les différences précises en termes de direction et de lever, que nous avons observées entre les lettres arabes et latines chez des adultes pourraient donner lieu à une réflexion sur la manière dont les nouvelles primitives de mouvements s'acquièrent. La population du collège Saint Mauront semble très intéressante pour étudier ce phénomène. En effet, les élèves présentent une variabilité dans le niveau en arabe à l'entrée au collège et suivent tous des cours pendant 4 ans, jusqu'à la troisième. Nous pourrions imaginer comparer la copie des lettres arabes et françaises en ciblant spécifiquement le sens de

tracé des courbes, qui semble être, chez l'adulte, l'indice le plus fort pour caractériser les deux systèmes graphiques. Comment l'intégration du sens de tracé des courbes pour l'arabe va-t-il se mettre en place ? Une telle étude permettrait de voir si en début d'apprentissage les élèves réutilisent des primitives de leur système graphique maternel, c'est-à-dire tracent les parties courbes des lettres de façon anti-horaire, et comment ils se détachent de ces primitives maternelles pour s'adapter à leur nouveau système graphique.

Au-delà de l'intérêt purement fondamental de cette question, mieux comprendre comment les élèves intègrent ces nouvelles primitives pourrait être important pour optimiser les techniques pédagogiques d'apprentissage manuscrit de l'arabe en tant que langue seconde à l'école. Par exemple, en alliant analyse comportementale et d'imagerie cérébrale de l'écriture chez les bigraphes experts, nous avons vu que les directions d'écriture et les composantes topocinétiques pouvaient entraîner une organisation spécifique du cerveau pendant la copie de lettres arabes et latines. Nous pouvons supposer qu'une mauvaise distinction cérébrale des deux systèmes graphiques pourrait entraîner une difficulté à produire correctement les lettres. Pour faire cette distinction, il semble donc important de focaliser les apprentissages sur l'aspect tactilo-kinesthésique, l'attention visuo-spatiale, et les aspects morphocinétiques et topocinétiques de l'écriture.

Un point que nous n'avons pas abordé mais qui semble très intéressant, est la question du bigraphisme en dactylographie. Dans notre étude, nous n'avons pas mesuré le niveau initial de frappe au clavier en français et en arabe. Comment se fait l'acquisition d'un second système graphique au clavier ? Les personnes bigraphes utilisant le clavier arabe et le clavier latin, présentent-ils une interférence, comme montré par Younes-Harb (en prep.) en écriture manuscrite, ou cela leur permet-il d'augmenter leur vitesse de frappe, comme cela semble être le cas dans la vitesse d'écriture manuscrite (Abizeid et coll., 2016) ? En ce qui concerne l'organisation cérébrale de ce mode d'écriture chez le bigraphe, doit-on s'attendre à la même discrimination que celle observée pendant l'écriture manuscrite ? L'organisation différente des réseaux cérébraux pour les deux systèmes graphiques qui a été observée dans l'analyse multivariée pourrait être moins forte si l'apprentissage des

lettres se fait par un clavier. En effet, le clavier ne semble pas être un outil qui favorise la discrimination des systèmes graphiques. On sait que les enfants qui apprennent à écrire au clavier ne développent pas bien leurs compétences visuo-spatiale (Mayer, 2020) et au clavier l'implication tactilo-kinesthésique est la même quel que soit le sens d'écriture.

Les tablettes numériques peuvent également s'utiliser avec un stylet et permettre une écriture '*enrichie*'. Par exemple, la sonification de l'écriture permet d'ajouter un indice auditif en fonction d'une variable (vitesse, fluidité...), informant le participant sur la justesse de son mouvement. Nous sommes en cours de réflexion, avec des enseignants d'arabe et des chercheurs en sciences de l'éducation et en neurosciences cognitives, pour définir les besoins pédagogiques et les solutions que pourrait apporter le numérique. Par exemple, en arabe l'apprentissage de l'association allographique entre les différentes formes des lettres (isolée et liées) semble être difficile à apprendre. Des solutions numériques pensées avec les enseignant-e-s pourraient faciliter cet apprentissage. Par exemple, utiliser des animations et du '*morphing*' pour réaliser un changement progressif des caractères en fonction de leur place dans le mot pourraient faciliter l'association des formes visuelles.

Plus généralement, cette question pourrait s'appliquer à toutes les situations dans lesquelles le système graphique de la langue seconde a des caractéristiques graphomotrices différentes de celui de la langue maternelle. Une autre question concerne l'avantage ou l'inconvénient d'apprendre plusieurs langues écrites pendant l'enfance. Ce débat qui a lieu pour le langage oral n'a pas encore été lancé à l'écrit pour le bigraphisme (mais voir Abized et coll., 2016). Dans ce cadre, nous sommes en cours d'analyse de données acquises dans plusieurs collèges pour déterminer si avoir eu des cours d'arabe en école primaire influence positivement ou négativement la pratique de l'écriture du français en 6^{ème}.

Enfin, un dernier point que nous n'avons pas abordé dans cette thèse concerne la variabilité entre les enfants dans l'évolution de leurs connaissances. Comme le montre le niveau en français des collégiens de notre étude, le facteur économique et social impacte négativement les possibilités d'apprentissage des enfants. Il est important de trouver des

bonnes pratiques pour réduire ces difficultés qui peuvent entraîner des retards d'apprentissage ou plus largement, un rejet du milieu scolaire. Ces enfants sont donc la cible privilégiée des études en neurosciences de l'éducation. Dans ce contexte, nous avons pu voir l'importance de coconstruire les protocoles de recherches en lien étroit avec les enseignants qui connaissent mieux que personne les limites du transfert d'un projet de recherche (ou d'une nouvelle méthode pédagogique) du laboratoire à la classe. De telles études ont beaucoup à apporter à l'école pour réduire les inégalités entre les enfants, en développant de nouveaux outils et méthodes pédagogiques qui permettront à chaque enfant d'acquérir les compétences primaires essentielles pour la suite de leur scolarité.

Références

- Abdelhadi, S., Ibrahim, R., & Eviatar, Z. (2011). Perceptual load in the reading of Arabic : Effects of orthographic visual complexity on detection. *Writing Systems Research*, 3(2), 117-127. <https://doi.org/10.1093/wsr/wsr014>
- Abizeid, C. M., Albaret, J.-M., & Faddoul, S. G. (2016). L'écriture chez les enfants bilingues et bigraphes au Liban. *Les entretiens de Psychomotricité 2016* (pp. 25-28). https://www.academia.edu/29011846/L_%C3%A9criture_chez_les_enfants_bilingues_et_bigraphes_au_Liban
- Abizeid, C., Tabsh Nakib, A., Younès Harb, C., Ghantous Faddoul, S., & Albaret, J.-M. (2017). Handwriting in Lebanese bigraphic children: Standardization of the BHK Scale. *Journal of Occupational Therapy, Schools, & Early Intervention*, 10(4), 420-435. <https://doi.org/10.1080/19411243.2017.1335260>
- Abraham, A., Pedregosa, F., Eickenberg, M., Gervais, P., Mueller, A., Kossaifi, J., Gramfort, A., Thirion, B., & Varoquaux, G. (2014). Machine learning for neuroimaging with scikit-learn. *Frontiers in Neuroinformatics*, 8, 14. <https://doi.org/10.3389/fninf.2014.00014>
- Abu-Rabia, S. (2002). Reading in a root-based-morphology language : The case of Arabic. *Journal of Research in Reading*, 25(3), 299-309. <https://doi.org/10.1111/1467-9817.00177>
- Alamargot, D., & Morin, M.-F. (2015). Does handwriting on a tablet screen affect students' graphomotor execution? A comparison between Grades Two and Nine. *Human Movement Science*, 44, 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2015.08.011>
- Alario, F.-X., Chainay, H., Lehericy, S., & Cohen, L. (2006). The role of the supplementary motor area (SMA) in word production. *Brain Research*, 1076(1), 129-143. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2005.11.104>
- Allal, I., Cheminal-Lancelot, R., Devaux, M.-F., Divry, J., Lequette, C., Maitrot, C., & Zorman, M. (2006). Repérage Orthographique Collectif (ROC).
- Alstad, Z., Barnett, A., Connelly, V., Berninger, V., & Sanders, E. (2015). Modes of Alphabet Letter Production during Middle Childhood and Adolescence : Interrelationships with Each Other and Other Writing Skills. *Journal of Writing Research*, 6(3), 199-231. <https://doi.org/10.17239/jowr-2015.06.03.1>
- 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(3), 749-766. <https://doi.org/10.1093/brain/113.3.749>

- Armstrong, P., & Wilkinson, B. (2016). Text entry of physical and virtual keyboards on tablets and the user perception. *Proceedings of the 28th Australian Conference on Computer-Human Interaction - OzCHI '16*, 401-405. <https://doi.org/10.1145/3010915.3011006>
- Avants, B.B., C.L. Epstein, M. Grossman, and J.C. Gee. 2008. "Symmetric Diffeomorphic Image Registration with Cross-Correlation: Evaluating Automated Labeling of Elderly and Neurodegenerative Brain." *Medical Image Analysis* 12 (1): 26-41. <https://doi.org/10.1016/j.media.2007.06.004>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2007.12.005>
- Babcock, M. K., & Freyd, J. J. (1988). Perception of Dynamic Information in Static Handwritten Forms. *The American Journal of Psychology*, 101(1), 111. <https://doi.org/10.2307/1422797>
- Bai, J., Shi, J., Jiang, Y., He, S., & Weng, X. (2011). Chinese and Korean Characters Engage the Same Visual Word Form Area in Proficient Early Chinese-Korean Bilinguals. *PLoS ONE*, 6(7), e22765. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0022765>
- Baker, C. I., Liu, J., Wald, L. L., Kwong, K. K., Benner, T., & Kanwisher, N. (2007). Visual word processing and experiential origins of functional selectivity in human extrastriate cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(21), 9087-9092. <https://doi.org/10.1073/pnas.0703300104>
- Bara, F., & Bonneton-Botté, N. (2018). Learning Letters With the Whole Body : Visuomotor Versus Visual Teaching in Kindergarten. *Perceptual and Motor Skills*, 125(1), 190-207. <https://doi.org/10.1177/0031512517742284>
- Bara, F., & Gentaz, E. (2011). Haptics in teaching handwriting : The role of perceptual and visuo-motor skills. *Human Movement Science*, 30(4), 745-759. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2010.05.015>
- Bara, F., Gentaz, E., & Colé, P. (2007). Haptics in learning to read with children from low socio-economic status families. *British Journal of Developmental Psychology*, 25(4), 643-663. <https://doi.org/10.1348/026151007X186643>
- Bara, F., Gentaz, E., Colé, P., & Sprenger-Charolles, L. (2004). The visuo-haptic and haptic exploration of letters increases the kindergarten-children's understanding of the alphabetic principle. *Cognitive Development*, 19(3), 433-449. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2004.05.003>
- Bara, F., Morin, M.-F., Alamargot, D., & Bosse, M.-L. (2016). Learning different allographs through handwriting : The impact on letter knowledge and reading acquisition. *Learning and Individual Differences*, 45, 88-94. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2015.11.020>
- Barsalou, L. W. (2008). Grounded Cognition. *Annual Review of Psychology*, 59(1), 617-645. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.59.103006.093639>

- Barsalou, L. W., Kyle Simmons, W., Barbey, A. K., & Wilson, C. D. (2003). Grounding conceptual knowledge in modality-specific systems. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(2), 84-91. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(02\)00029-3](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(02)00029-3)
- Barton, J. J. S., Fox, C. J., Sekunova, A., & Iaria, G. (2010). Encoding in the Visual Word Form Area : An fMRI Adaptation Study of Words versus Handwriting. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22(8), 1649-1661. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21286>
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using **lme4**. *Journal of Statistical Software*, 67(1). <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Behzadi, Y., Restom, K., Liau, J., & Liu, T. T. (2007). A component based noise correction method (CompCor) for BOLD and perfusion based fMRI. *NeuroImage*, 37(1), 90-101. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.04.042>
- Berninger, V. W., Abbott, R. D., Augsburger, A., & Garcia, N. (2009). Comparison of Pen and Keyboard Transcription Modes in Children with and without Learning Disabilities. *Learning Disability Quarterly*, 32(3), 123-141. <https://doi.org/10.2307/27740364>
- 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. <https://doi.org/10.1002/hbm.20124>
- Bonin, P., Méot, A., Lagarrigue, A., & Roux, S. (2015). Written object naming, spelling to dictation, and immediate copying : Different tasks, different pathways? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 68(7), 1268-1294. <https://doi.org/10.1080/17470218.2014.978877>
- Bonin, P., Peereman, R., & Fayol, M. (2001). Do phonological codes constrain the selection of orthographic codes in written picture naming? *Journal of Memory and Language*, 45(4), 688-720.
- Bornstein, M. H., Gross, C. G., & Wolf, J. Z. (1978). Perceptual similarity of mirror images in infancy. *Cognition*, 6(2), 89-116. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(78\)90017-3](https://doi.org/10.1016/0010-0277(78)90017-3)
- Boumaraf, A., & Macoir, J. (2016). The influence of visual word form in reading : Single case study of an Arabic patient with deep dyslexia. *Reading and Writing*, 29(1), 137-158. <https://doi.org/10.1007/s11145-015-9583-y>
- Brett, M., Anton, J.-L., Valabregue, R., Poline, J.-B. (2012). Region of interest analysis using an SPM toolbox [abstract]. In: 8th International Conference on Functional Mapping of the Human Brain, 16(2), Sendai, Japan: Neuroimage
- Bunčić, D., Lippert, S. L., Rabus, A., & Antipova, A. (Éds.). (2016). *Biscriptality : A sociolinguistic typology*. Universitätsverlag Winter.
- Cao, F., Lee, R., Shu, H., Yang, Y., Xu, G., Li, K., & Booth, J. R. (2010). Cultural Constraints on Brain Development : Evidence from a Developmental Study of Visual Word Processing in Mandarin Chinese. *Cerebral Cortex*, 20(5), 1223-1233. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhp186>

Cao, F., & Perfetti, C. A. (2016). Neural Signatures of the Reading-Writing Connection : Greater Involvement of Writing in Chinese Reading than English Reading. *PLOS ONE*, 11(12), e0168414. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168414>

Cao, F., Vu, M., Lung Chan, D. H., Lawrence, J. M., Harris, L. N., Guan, Q., Xu, Y., & Perfetti, C. A. (2013). Writing affects the brain network of reading in Chinese : A functional magnetic resonance imaging study. *Human Brain Mapping*, 34(7), 1670-1684. <https://doi.org/10.1002/hbm.22017>

Caspers, S., Amunts, K., & Zilles, K. (2012). Posterior Parietal Cortex. In *The Human Nervous System* (p. 1036-1055). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374236-0.10028-8>

Chamoux, J. (2019). *Contes et récits de Saint Mauront : un collège peu ordinaire à Marseille*. Edition Gaussien. ISBN: 978-2-35698-172-1

Chang, L.-Y., Chen, Y.-C., & Perfetti, C. A. (2018). GraphCom : A multidimensional measure of graphic complexity applied to 131 written languages. *Behavior Research Methods*, 50(1), 427-449. <https://doi.org/10.3758/s13428-017-0881-y>

Chaparro, B. S., Phan, M. H., Siu, C., & Jardina, J. R. (2014). User Performance and Satisfaction of Tablet Physical Keyboards. *J. Usability Studies*, 9(2), 70-80.

Chartrel, E., & Vinter, A. (2004). L'écriture : Une activité longue et complexe à acquérir. [Writing acquisition : A long, complex process.]. *A.N.A.E. Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant*, 16(3[78]), 174-180.

Chartrel, E., & Vinter, A. (2006). Rôle des informations visuelles dans la production de lettres cursives chez l'enfant et l'adulte. *L'Année psychologique*, 106(01), 43. <https://doi.org/10.4074/S0003503306001047>

Chettouf, S., Rueda-Delgado, L. M., de Vries, R., Ritter, P., & Daffertshofer, A. (2020). Are unimanual movements bilateral? *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 113, 39-50. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2020.03.002>

Chihi, I., Abdelkrim, A., & Benrejeb, M. (2017). Internal model control to characterize human handwriting motion. *Int. Arab J. Inf. Technol.*

Christensen, C. A. (2004). Relationship between orthographic-motor integration and computer use for the production of creative and well-structured written text. *The British Journal of Educational Psychology*, 74(Pt 4), 551-564. <https://doi.org/10.1348/0007099042376373>

Cochran-Smith, M. (1991). Word Processing and Writing in Elementary Classrooms : A Critical Review of Related Literature. *Review of Educational Research*, 61(1), 107-155. <https://doi.org/10.3102/00346543061001107>

Cohen, L. (2003). Visual Word Recognition in the Left and Right Hemispheres : Anatomical and Functional Correlates of Peripheral Alexias. *Cerebral Cortex*, 13(12), 1313-1333. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhg079>

Cohen, L., & Dehaene, S. (2004). Specialization within the ventral stream : The case for the visual word form area. *NeuroImage*, 22(1), 466-476. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2003.12.049>

Cohen, L., Lehericy, S., Chochon, F., Lemer, C., Rivaud, S., & Dehaene, S. (2002). Language-specific tuning of visual cortex? Functional properties of the Visual Word Form Area. *Brain*, 125(5), 1054-1069. <https://doi.org/10.1093/brain/awf094>

Connelly, V., Gee, D., & Walsh, E. (2007). A comparison of keyboarded and handwritten compositions and the relationship with transcription speed. *British Journal of Educational Psychology*, 77(2), 479-492. <https://doi.org/10.1348/000709906X116768>

Cook, F. A. B., Makin, S. D. J., Wardlaw, J., & Dennis, M. S. (2013). Dystypia in acute stroke not attributable to aphasia or neglect. *BMJ Case Reports*, 2013, bcr2013200257. <https://doi.org/10.1136/bcr-2013-200257>

Cooper, W. E. (1983). *Cognitive Aspects of Skilled Typewriting*. Springer Science & Business Media.

Corballis, M. C., & Beale, I. L. (1976). *The psychology of left and right* (p. x, 227). Lawrence Erlbaum.

Cornell, J. M. (1985). Spontaneous mirror-writing in children. *Canadian Journal of Psychology/Revue Canadienne de Psychologie*, 39(1), 174-179. <https://doi.org/10.1037/h0080122>

Cox, Robert W., and James S. Hyde. 1997. "Software Tools for Analysis and Visualization of fMRI Data." *NMR in Biomedicine* 10 (4-5): 171-78. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1492\(199706/08\)10:4/5<171::AID-NBM453>3.0.CO;2-L](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1492(199706/08)10:4/5<171::AID-NBM453>3.0.CO;2-L)

Crump, M. J. C., & Logan, G. D. (2010). Warning : This keyboard will deconstruct— The role of the keyboard in skilled typewriting. *Psychonomic Bulletin & Review*, 17(3), 394-399. <https://doi.org/10.3758/PBR.17.3.394>

Daniels, P. T., & Share, D. L. (2018). Writing System Variation and Its Consequences for Reading and Dyslexia. *Scientific Studies of Reading*, 22(1), 101-116. <https://doi.org/10.1080/10888438.2017.1379082>

Danna, J., Nordlund, M., Louber, D., Moré, S., & Mouchnino, L. (2021). Overpressure on fingertips prevents state estimation of the pen grip force and movement accuracy. *Experimental Brain Research*. <https://doi.org/10.1007/s00221-021-06246-x>

Danna, J., Paz-Villagrán, V., & Velay, J.-L. (2013). Signal-to-Noise velocity peaks difference : A new method for evaluating the handwriting movement fluency in children with dysgraphia. *Research in Developmental Disabilities*, 34(12), 4375-4384. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2013.09.012>

Danna, J., & Velay, J.-L. (2015). Basic and supplementary sensory feedback in handwriting. *Frontiers in Psychology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00169>

Dehaene, S. 2007. *Les neurones de la lecture*. Paris, Odile Jacob.

- Dehaene, S. (2014). *Reading in the Brain* Revised and Extended : Response to Comments. *Mind & Language*, 29(3), 320-335. <https://doi.org/10.1111/mila.12053>
- Dehaene, S., & Cohen, L. (2007). Cultural Recycling of Cortical Maps. *Neuron*, 56(2), 384-398. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2007.10.004>
- Dehaene, S., Cohen, L., Morais, J., & Kolinsky, R. (2015). Illiterate to literate : Behavioural and cerebral changes induced by reading acquisition. *Nature Reviews Neuroscience*, 16(4), 234-244. <https://doi.org/10.1038/nrn3924>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.05.004>
- Dehaene, S., Pegado, F., Braga, L. W., Ventura, P., Filho, G. N., Jobert, A., Dehaene-Lambertz, G., Kolinsky, R., Morais, J., & Cohen, L. (2010). How Learning to Read Changes the Cortical Networks for Vision and Language. *Science*, 330(6009), 1359-1364. <https://doi.org/10.1126/science.1194140>
- Dehaene, S., Pegado, F., Braga, L. W., Ventura, P., Filho, G. N., Jobert, A., Dehaene-Lambertz, G., Kolinsky, R., Morais, J., & Cohen, L. (2011). L'impact de l'apprentissage de la lecture sur le cerveau. *médecine/sciences*, 27(3), 236-238. <https://doi.org/10.1051/medsci/2011273236>
- Dehaene-Lambertz, G., Monzalvo, K., & Dehaene, S. (2018). The emergence of the visual word form : Longitudinal evolution of category-specific ventral visual areas during reading acquisition. *PLOS Biology*, 16(3), e2004103. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2004103>
- 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. <https://doi.org/10.1006/nimg.1997.0314>
- Delazer, M., Lochy, A., Jenner, C., Domahs, F., & Benke, T. (2002). When writing 0 (zero) is easier than writing O (o) : A neuropsychological case study of agraphia. *Neuropsychologia*, 40(12), 2167-2177. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(02\)00044-1](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(02)00044-1)
- Dosenbach, N. U. F., Koller, J. M., Earl, E. A., Miranda-Dominguez, O., Klein, R. L., Van, A. N., Snyder, A. Z., Nagel, B. J., Nigg, J. T., Nguyen, A. L., Wesevich, V., Greene, D. J., & Fair, D. A. (2017). Real-time motion analytics during brain MRI improve data quality and reduce costs. *NeuroImage*, 161, 80-93. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.08.025>
- Doyon, J., & Benali, H. (2005). Reorganization and plasticity in the adult brain during learning of motor skills. *Proceedings. 2005 IEEE International Joint Conference on Neural Networks, 2005.*, 3, 1523-1524. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2005.1556102>
- el Alaoui-Faris, M., Benbelaid, F., Alaoui, C., Tahiri, L., Jiddane, M., Amarti, A., & Chkili, T. (1994). [Alexia without agraphia in the Arabic language. Neurolinguistic and and MRI study]. *Revue Neurologique*, 150(11), 771-775.

Ellis. (1982). *Spelling and writing (and reading and speaking)*. In A. W. Ellis (Ed.), *Normality and pathology in cognitive functions*. London : Academic Press. ER -.

Ellis, A. W. (1988). Normal writing processes and peripheral acquired dysgraphias. *Language and Cognitive Processes*, 3(2), 99-127. <https://doi.org/10.1080/01690968808402084>

Esteban, Oscar, Ross Blair, Christopher J. Markiewicz, Shoshana L. Berleant, Craig Moodie, Feilong Ma, Ayse Ilkay Isik, et al. 2018a. "fMRIPrep." Software. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.852659>.

Esteban, Oscar, Christopher Markiewicz, Ross W Blair, Craig Moodie, Ayse Ilkay Isik, Asier Erramuzpe Aliaga, James Kent, et al. 2018b. "fMRIPrep: A Robust Preprocessing Pipeline for Functional MRI." *Nature Methods*. <https://doi.org/10.1038/s41592-018-0235-4>.

Eviatar, Z. (1995). Reading Direction and Attention—Effects on Lateralized Ignoring. *Brain and Cognition*, 29(2), 137-150. <https://doi.org/10.1006/brcg.1995.1273>

Eviatar, Z., & Ibrahim, R. (2004). Morphological and orthographic effects on hemispheric. *Reading and Writing*, 17(7-8), 691-705. <https://doi.org/10.1007/s11145-004-2659-8>

Eviatar, Z., Ibrahim, R., & Ganayim, D. (2004). Orthography and the Hemispheres : Visual and Linguistic Aspects of Letter Processing. *Neuropsychology*, 18(1), 174-184. <https://doi.org/10.1037/0894-4105.18.1.174>

Fabre, M., Antoine, M., Robitaille, M. G., Ribot-Ciscar, E., Ackerley, R., Aimonetti, J.-M., Chavet, P., Blouin, J., Simoneau, M., & Mouchnino, L. (2021). Large Postural Sways Prevent Foot Tactile Information From Fading : Neurophysiological Evidence. *Cerebral Cortex Communications*, 2(1), tgaa094. <https://doi.org/10.1093/texcom/tgaa094>

Fagard, J., & Dahmen, R. (2003). The effects of reading-writing direction on the asymmetry of space perception and directional tendencies : A comparison between French and Tunisian children. *Laterality: Asymmetries of Body, Brain and Cognition*, 8(1), 39-52. <https://doi.org/10.1080/713754473>

Fedorenko, E., Behr, M. K., & Kanwisher, N. (2011). Functional specificity for high-level linguistic processing in the human brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(39), 16428-16433. <https://doi.org/10.1073/pnas.1112937108>

Feng, X., Altarelli, I., Monzalvo, K., Ding, G., Ramus, F., Shu, H., Dehaene, S., Meng, X., & Dehaene-Lambertz, G. (2020). A universal reading network and its modulation by writing system and reading ability in French and Chinese children. *ELife*, 9, e54591. <https://doi.org/10.7554/eLife.54591>

Fernandes, T., & Araújo, S. (2021). From Hand to Eye With the Devil In-Between : Which Cognitive Mechanisms Underpin the Benefit From Handwriting Training When Learning Visual Graphs? *Frontiers in Psychology*, 12, 736507. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.736507>

Fischer, J.-P., & Tazouti, Y. (2012). Unraveling the mystery of mirror writing in typically developing children. *Journal of Educational Psychology*, 104(1), 193-205. <https://doi.org/10.1037/a0025735>

- Fiset, D., Blais, C., Arguin, M., Tadros, K., Éthier-Majcher, C., Bub, D., & Gosselin, F. (2009). The spatio-temporal dynamics of visual letter recognition. *Cognitive Neuropsychology*, 26(1), 23-35. <https://doi.org/10.1080/02643290802421160>
- Fiset, D., Blais, C., Éthier-Majcher, C., Arguin, M., Bub, D., & Gosselin, F. (2008). Features for Identification of Uppercase and Lowercase Letters. *Psychological Science*, 19(11), 1161-1168. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2008.02218.x>
- Fiset, S., Arguin, M., & Fiset, D. (2006). An attempt to simulate letter-by-letter dyslexia in normal readers. *Brain and Language*, 98(3), 251-263. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2006.05.003>
- Flores d'Arcais, G. B. (1994). Order of strokes writing as a cue for retrieval in reading Chinese characters. *European Journal of Cognitive Psychology*, 6(4), 337-355. <https://doi.org/10.1080/09541449408406519>
- Foulin, J.-N. (2005). Why is letter-name knowledge such a good predictor of learning to read? *Reading and Writing*, 18(2), 129-155. <https://doi.org/10.1007/s11145-004-5892-2>
- Foulin, J.-N. (2007). La connaissance des lettres chez les prélecteurs : Aspects pronostiques, fonctionnels et diagnostiques. *Psychologie Française*, 52(4), 431-444. <https://doi.org/10.1016/j.psfr.2006.12.004>
- Frangou, S.-M., Ruokamo, H., Parviainen, T., & Wikgren, J. (2018). Can you put your finger on it? The effects of writing modality on Finnish students' recollection. *Writing Systems Research*, 10(2), 82-94. <https://doi.org/10.1080/17586801.2018.1536015>
- Frangou, S.-M., Wikgren, J., Sintonen, S., Kairaluoma, L., & Vasari, P. (2019). The effect of writing modality on recollection in children and adolescents. *Research in Learning Technology*, 27(0). <https://doi.org/10.25304/rlt.v27.2239>
- Freyd, J. J. (1983a). The mental representation of movement when static stimuli are viewed. *Perception & Psychophysics*, 33(6), 575-581. <https://doi.org/10.3758/BF03202940>
- Freyd, J. J. (1983b). Representing the dynamics of a static form. *Memory & Cognition*, 11(4), 342-346. <https://doi.org/10.3758/BF03202447>
- Freyd, J. J. (1987). Dynamic mental representations. *Psychological Review*, 94(4), 427-438. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.94.4.427>
- Friston, K. J., Holmes, A. P., Poline, J.-B., Grasby, P. J., Williams, S. C. R., Frackowiak, R. S. J., & Turner, R. (1995). Analysis of fMRI Time-Series Revisited. *NeuroImage*, 2(1), 45-53. <https://doi.org/10.1006/nimg.1995.1007>
- Frost, R. (2012). Towards a universal model of reading. *Behavioral and Brain Sciences*, 35(5), 263-279. <https://doi.org/10.1017/S0140525X11001841>

Fukushima, K. (1988). Neocognitron : A hierarchical neural network capable of visual pattern recognition. *Neural Networks*, 1(2), 119-130. [https://doi.org/10.1016/0893-6080\(88\)90014-7](https://doi.org/10.1016/0893-6080(88)90014-7)

Gelman, A. & Hill, J. (2007). *Data Analysis Using Regression and Multilevel/Hierarchical Models* (1er édition). Cambridge University Press.

Gentaz, E., Colé, P., & Bara, F. (2003). Évaluation d'entraînements multi-sensoriels de préparation à la lecture pour les enfants en grande section de maternelle : Une étude sur la contribution du système haptique manuel. *L'année psychologique*, 103(4), 561-584. <https://doi.org/10.3406/psy.2003.29652>

Gentner, D. R. (1983). The acquisition of typewriting skill. *Acta Psychologica*, 54(1), 233-248. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(83\)90037-9](https://doi.org/10.1016/0001-6918(83)90037-9)

Gentner, D. R. (1987). Timing of skilled motor performance : Tests of the proportional duration model. *Psychological Review*, 94(2), 255-276. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.94.2.255>

Gerloff, C. (1997). Stimulation over the human supplementary motor area interferes with the organization of future elements in complex motor sequences. *Brain*, 120(9), 1587-1602. <https://doi.org/10.1093/brain/120.9.1587>

Gerloff, C. (1998). Functional coupling and regional activation of human cortical motor areas during simple, internally paced and externally paced finger movements. *Brain*, 121(8), 1513-1531. <https://doi.org/10.1093/brain/121.8.1513>

Gerth, S., Klassert, A., Dolk, T., Fliesser, M., Fischer, M. H., Nottbusch, G., & Festman, J. (2016). Is Handwriting Performance Affected by the Writing Surface? Comparing Preschoolers', Second Graders', and Adults' Writing Performance on a Tablet vs. Paper. *Frontiers in Psychology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01308>

Geyer, L. H., & DeWald, C. G. (1973). Feature lists and confusion matrices. *Perception & Psychophysics*, 14(3), 471-482. <https://doi.org/10.3758/BF03211185>

Guidère, M. (2005). *Kalimât : Le vocabulaire arabe*. Edition Ellipses. ISBN: 978-2-7298-1510-3

Gibson, E. J. (1969). *Principles of perceptual learning and development*. Appleton-Century-Crofts.

Giordano, B. L., Whiting, W., Kriegeskorte, N., Kotz, S. A., Belin, P., & Gross, J. (2018). *From categories to dimensions : Spatio-temporal dynamics of the cerebral representations of emotion in voice* [Preprint]. Neuroscience. <https://doi.org/10.1101/265843>

Gobet, F., Lloyd-Kelly, M., & Lane, P. C. R. (2016). What's in a Name? The Multiple Meanings of "Chunk" and "Chunking". *Frontiers in Psychology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00102>

Goodnow, J. J., Friedman, S. L., Bernbaum, M., & Lehman, E. B. (1973). Direction and Sequence in Copying: The Effect of Learning to Write in English and Hebrew. *Journal of Cross-Cultural Psychology*, 4(3), 263-282. <https://doi.org/10.1177/002202217300400301>

- Goodnow, J. J., & Levine, R. A. (1973). "The grammar of action" : Sequence and syntax in children's copying. *Cognitive Psychology*, 4(1), 82-98. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(73\)90005-4](https://doi.org/10.1016/0010-0285(73)90005-4)
- Gordon, A. M., Lee, J.-H., Flament, D., Ugurbil, K., & Ebner, T. J. (1998). Functional magnetic resonance imaging of motor, sensory, and posterior parietal cortical areas during performance of sequential typing movements. *Experimental Brain Research*, 121(2), 153-166. <https://doi.org/10.1007/s002210050447>
- Grainger, J., Rey, A., & Dufau, S. (2008). Letter perception : From pixels to pandemonium. *Trends in Cognitive Sciences*, 12(10), 381-387. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.06.006>
- Greve, Douglas N, and Bruce Fischl. 2009. "Accurate and Robust Brain Image Alignment Using Boundary-Based Registration." *NeuroImage* 48 (1): 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.06.060>.
- Grossberg, S., & Paine, R. W. (2000). A neural model of cortico-cerebellar interactions during attentive imitation and predictive learning of sequential handwriting movements. *Neural Networks*, 13(8-9), 999-1046. [https://doi.org/10.1016/S0893-6080\(00\)00065-4](https://doi.org/10.1016/S0893-6080(00)00065-4)
- Guan, C. Q., Liu, Y., Chan, D. H. L., Ye, F., & Perfetti, C. A. (2011). Writing strengthens orthography and alphabetic-coding strengthens phonology in learning to read Chinese. *Journal of Educational Psychology*, 103(3), 509-522. <https://doi.org/10.1037/a0023730>
- Guilbert, J., Alamargot, D., & Morin, M.-F. (2019). Handwriting on a tablet screen : Role of visual and proprioceptive feedback in the control of movement by children and adults. *Human Movement Science*, 65, 30-41. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2018.09.001>
- Haar, S., Dinstein, I., Shelef, I., & Donchin, O. (2017). Effector-Invariant Movement Encoding in the Human Motor System. *Journal of Neuroscience*, 37(37), 9054-9063. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1663-17.2017>
- Haar, S., Donchin, O., & Dinstein, I. (2015). Dissociating Visual and Motor Directional Selectivity Using Visuomotor Adaptation. *Journal of Neuroscience*, 35(17), 6813-6821. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0182-15.2015>
- Hashimoto, R., Tanaka, Y., & Yoshida, M. (1998). Selective Kana Jargonaphia Following Right Hemispheric Infarction. *Brain and Language*, 63(1), 50-63. <https://doi.org/10.1006/brln.1997.1865>
- Haxby, J. V., Gobbini, M. I., Furey, M. L., Ishai, A., Schouten, J. L., & Pietrini, P. (2001). Distributed and Overlapping Representations of Faces and Objects in Ventral Temporal Cortex. *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.1063736>
- Haynes, J.-D. (2015). A Primer on Pattern-Based Approaches to fMRI : Principles, Pitfalls, and Perspectives. *Neuron*, 87(2), 257-270. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.05.025>
- Hepp-Reymond, M.-C., Chakarov, V., Schulte-Mönting, J., Huethe, F., & Kristeva, R. (2009). Role of proprioception and vision in handwriting. *Brain Research Bulletin*, 79(6), 365-370. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2009.05.013>

Hervais-Adelman, A., Kumar, U., Mishra, R. K., Tripathi, V. N., Guleria, A., Singh, J. P., Eisner, F., & Huettig, F. (2019). Learning to read recycles visual cortical networks without destruction. *Science Advances*, 5(9), eaax0262. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax0262>

Higashiyama, Y., Takeda, K., Someya, Y., Kuroiwa, Y., & Tanaka, F. (2015). The Neural Basis of Typewriting: A Functional MRI Study. *PLOS ONE*, 10(7), e0134131. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0134131>

Horwitz, S. (2017). Is Note-Taking More Effective with a Keyboard or a Pen? https://scholar.colorado.edu/concern/undergraduate_honors_theses/00000047w

Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1962). Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex. *The Journal of Physiology*, 160(1), 106-154. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1962.sp006837>

Ibrahim, R. (2009). Selective deficit of second language : A case study of a brain-damaged Arabic-Hebrew bilingual patient. *Behavioral and Brain Functions*, 5(1), 17. <https://doi.org/10.1186/1744-9081-5-17>

Ibrahim, R., & Aharon-Peretz, J. (2005). Is Literary Arabic a Second Language for Native Arab Speakers? : Evidence from Semantic Priming Study. *Journal of Psycholinguistic Research*, 34(1), 51-70. <https://doi.org/10.1007/s10936-005-3631-8>

Ibrahim, R., Eviatar, Z., & Aharon-Peretz, J. (2007). Metalinguistic Awareness and Reading Performance : A Cross Language Comparison. *Journal of Psycholinguistic Research*, 36(4), 297-317. <https://doi.org/10.1007/s10936-006-9046-3>

Ikkai, A., Jerde, T. A., & Curtis, C. E. (2011). Perception and Action Selection Dissociate Human Ventral and Dorsal Cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(6), 1494-1506. <https://doi.org/10.1162/jocn.2010.21499>

James, K. H., & Atwood, T. P. (2009). The role of sensorimotor learning in the perception of letter-like forms : Tracking the causes of neural specialization for letters. *Cognitive Neuropsychology*, 26(1), 91-110. <https://doi.org/10.1080/02643290802425914>

James, K. H., & Engelhardt, L. (2012). The effects of handwriting experience on functional brain development in pre-literate children. *Trends in Neuroscience and Education*, 1(1), 32-42. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2012.08.001>

James, K. H., & Gauthier, I. (2006). Letter processing automatically recruits a sensory-motor brain network. *Neuropsychologia*, 44(14), 2937-2949. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.06.026>

James, K. H., James, T. W., Jobard, G., Wong, A. C.-N., & Gauthier, I. (2005). Letter processing in the visual system : Different activation patterns for single letters and strings. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 5(4), 452-466. <https://doi.org/10.3758/CABN.5.4.452>

Jean, G. (1987). *L'écriture, mémoire des hommes*. Paris : Gallimard

Jenkinson, Mark, Peter Bannister, Michael Brady, and Stephen Smith. 2002. "Improved Optimization for the Robust and Accurate Linear Registration and Motion Correction of Brain Images." *NeuroImage* 17 (2): 825-41. <https://doi.org/10.1006/nimg.2002.1132>.

Jenkinson, Mark, and Stephen Smith. 2001. "A Global Optimisation Method for Robust Affine Registration of Brain Images." *Medical Image Analysis* 5 (2): 143-56. [https://doi.org/10.1016/S1361-8415\(01\)00036-6](https://doi.org/10.1016/S1361-8415(01)00036-6).

Joseph, J. E., Cerullo, M. A., Farley, A. B., Steinmetz, N. A., & Mier, C. R. (2006). FMRI correlates of cortical specialization and generalization for letter processing. *NeuroImage*, 32(2), 806-820. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.04.175>

Kadmon Harpaz, N., Flash, T., & Dinstein, I. (2014). Scale-Invariant Movement Encoding in the Human Motor System. *Neuron*, 81(2), 452-462. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2013.10.058>

Kandel, S. (in press.). *The APOMI model of word writing : Anticipatory Processing of Orthographic and Motor Information*. 24.

Kasper, L., Bollmann, S., Diaconescu, A. O., Hutton, C., Heinzle, J., Iglesias, S., Hauser, T. U., Sebold, M., Manjaly, Z.-M., Pruessmann, K. P., & Stephan, K. E. (2017). The PhysIO Toolbox for Modeling Physiological Noise in fMRI Data. *Journal of Neuroscience Methods*, 276, 56-72. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2016.10.019>

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.

Kawamura, M., Hirayama, K., Hasegawa, K., Takahashi, N., & Yamaura, A. (1987). Alexia with agraphia of kanji (Japanese morphograms). *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 50(9), 1125-1129. <https://doi.org/10.1136/jnnp.50.9.1125>

Keren, G., & Baggen, S. (1981). Recognition models of alphanumeric characters. *Perception & Psychophysics*, 29(3), 234-246. <https://doi.org/10.3758/BF03207290>

Kersey, A. J., & James, K. H. (2013). Brain activation patterns resulting from learning letter forms through active self-production and passive observation in young children. *Frontiers in Psychology*, 4. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00567>

Kiefer, M., Schuler, S., Mayer, C., Trumpp, N. M., Hille, K., & Sachse, S. (2015). Handwriting or Typewriting? The Influence of Penor Keyboard-Based Writing Training on Reading and Writing Performance in Preschool Children. *Advances in Cognitive Psychology*, 11, 136-146. <https://doi.org/10.5709/acp-0178-7>

Kiefer, M., & Trumpp, N. M. (2012). Embodiment theory and education : The foundations of cognition in perception and action. *Trends in Neuroscience and Education*, 1(1), 15-20. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2012.07.002>

Kiefer, M., & Velay, J.-L. (2016). Writing in the digital age. *Trends in Neuroscience and Education*, 5(3), 77-81. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2016.07.008>

Kourtzi, Z., & Kanwisher, N. (2000). Activation in Human MT/MST by Static Images with Implied Motion. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(1), 48-55. <https://doi.org/10.1162/08989290051137594>

Krafnick, A. J., Tan, L.-H., Flowers, D. L., Luetje, M. M., Napoliello, E. M., Siok, W.-T., Perfetti, C., & Eden, G. F. (2016). Chinese Character and English Word processing in children's ventral occipitotemporal cortex: FMRI evidence for script invariance. *NeuroImage*, 133, 302-312. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.03.021>

Kriegeskorte, N., Goebel, R., & Bandettini, P. (2006). Information-based functional brain mapping. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(10), 3863-3868. <https://doi.org/10.1073/pnas.0600244103>

Kuznetsova, A., Brockhoff, P. B., & Christensen, R. H. B. (2017). **lmerTest** Package : Tests in Linear Mixed Effects Models. *Journal of Statistical Software*, 82(13). <https://doi.org/10.18637/jss.v082.i13>

Labat, H., Boisson, A., Brunel, L., Ecalle, J., Versace, R., & Magnan, A. (2020). Multisensory letter integration and implicit learning of reading with 5-year-old children. *European Review of Applied Psychology*, 70(1), 100477. <https://doi.org/10.1016/j.erap.2019.100477>

Lacquaniti, F., Terzuolo, C., & Viviani, P. (1983). The law relating the kinematic and figural aspects of drawing movements. *Acta Psychologica*, 54(1-3), 115-130. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(83\)90027-6](https://doi.org/10.1016/0001-6918(83)90027-6)

Lanczos, C. 1964. "Evaluation of Noisy Data." *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics Series B Numerical Analysis* 1 (1): 76-85. <https://doi.org/10.1137/0701007>.

Lavie, N. (1995). Perceptual load as a necessary condition for selective attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21(3), 451-468. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.21.3.451>

Lavie, N., & Dalton, P. (2014). Load theory of attention and cognitive control. In *The Oxford handbook of attention* (p. 56-75). Oxford University Press.

Lebon, F., Gueugneau, N., & Papaxanthis, C. (2013). Modèles internes et imagerie motrice. *Movement & Sport Sciences - Science & Motricité*, 82, 51-61. <https://doi.org/10.1051/sm/20103092>

Lenth, R.V. (2021). emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. R package version 1.6.1. <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>

Li, J. X., & James, K. H. (2016). Handwriting generates variable visual output to facilitate symbol learning. *Journal of Experimental Psychology: General*, 145(3), 298-313. <https://doi.org/10.1037/xge0000134>

Li, J.-L., & Yeh, S.-L. (2003). Do « Chinese and American see opposite apparent motions in a Chinese character »? Tse and Cavanagh (2000) replicated and revised. *Visual Cognition*, 10(5), 537-547. <https://doi.org/10.1080/13506280244000195>

Lin, C.-Y., Xiao, Z.-W., Shen, L., Zhang, J. X., & Weng, X.-C. (2007). Similar brain activation patterns for writing logographic and phonetic symbols in Chinese. *NeuroReport*, 18(15), 1621-1625. <https://doi.org/10.1097/WNR.0b013e3282f0405b>

Linderman, M., Lebedev, M. A., & Erlichman, J. S. (2009). Recognition of Handwriting from Electromyography. *PLoS ONE*, 4(8), e6791. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0006791>

Liu, C., Zhang, W.-T., Tang, Y.-Y., Mai, X.-Q., Chen, H.-C., Tardif, T., & Luo, Y.-J. (2008). The Visual Word Form Area : Evidence from an fMRI study of implicit processing of Chinese characters. *NeuroImage*, 40(3), 1350-1361. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.10.014>

Liu, X., Crump, M. J. C., & Logan, G. D. (2010). Do you know where your fingers have been? Explicit knowledge of the spatial layout of the keyboard in skilled typists. *Memory & Cognition*, 38(4), 474-484. <https://doi.org/10.3758/MC.38.4.474>

Liu, Y., & Perfetti, C. A. (2003). The time course of brain activity in reading English and Chinese : An ERP study of Chinese bilinguals. *Human Brain Mapping*, 18(3), 167-175. <https://doi.org/10.1002/hbm.10090>

Logan, G. D. (2003). Simon-Type Effects : Chronometric Evidence for Keypress Schemata in Typewriting. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29(4), 741-757. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.29.4.741>

Logan, G. D. (2018). Automatic control : How experts act without thinking. *Psychological Review*, 125(4), 453-485. <https://doi.org/10.1037/rev0000100>

Logan, G. D., & Crump, M. J. C. (2009). The Left Hand Doesn't Know What the Right Hand Is Doing : The Disruptive Effects of Attention to the Hands in Skilled Typewriting. *Psychological Science*, 20(10), 1296-1300. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2009.02442.x>

Logan, G. D., & Crump, M. J. C. (2011). Hierarchical Control of Cognitive Processes. In *Psychology of Learning and Motivation* (Vol. 54, p. 1-27). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385527-5.00001-2>

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. [https://doi.org/10.1016/S1053-8119\(03\)00088-0](https://doi.org/10.1016/S1053-8119(03)00088-0)

Longcamp, M., Boucard, C., Gilhodes, J.-C., Anton, J.-L., Roth, M., Nazarian, B., & Velay, J.-L. (2008). Learning through Hand- or Typewriting Influences Visual Recognition of New Graphic Shapes : Behavioral and Functional Imaging Evidence. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(5), 802-815. <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.20504>

Longcamp, M., Boucard, C., Gilhodes, J.-C., & Velay, J.-L. (2006). Remembering the orientation of newly learned characters depends on the associated writing knowledge : A comparison between handwriting and typing. *Human Movement Science*, 25(4-5), 646-656. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2006.07.007>

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. <https://doi.org/10.1002/hbm.21105>

Longcamp, M., Hupé, J.-M., Ruiz, M., Vayssière, N., & Sato, M. (2019). Shared premotor activity in spoken and written communication. *Brain and Language*, 199, 104694. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2019.104694>

Longcamp, M., Lagarrigue, A., Nazarian, B., Roth, M., Anton, J.-L., Alario, F.-X., & Velay, J.-L. (2014). Functional specificity in the motor system : Evidence from coupled fMRI and kinematic recordings during letter and digit writing: Functional Specificity During Letter and Digit Writing. *Human Brain Mapping*, 35(12), 6077-6087. <https://doi.org/10.1002/hbm.22606>

Longcamp, M., Lagarrigue, A., & Velay, J.-L. (2010). Contribution de la motricité graphique à la reconnaissance visuelle des lettres. *Psychologie Française*, 55(2), 181-194. <https://doi.org/10.1016/j.psfr.2010.03.001>

Longcamp, M., Zerbato-Poudou, M.-T., & Velay, J.-L. (2005). The influence of writing practice on letter recognition in preschool children : A comparison between handwriting and typing. *Acta Psychologica*, 119(1), 67-79. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2004.10.019>

Maass, A., Suitner, C., & Deconchy, J.-P. (2014). *Living in an asymmetrical world : How writing direction affects thought and action* (p. xiii, 155). Psychology Press. <https://doi.org/10.4324/9781315780054>

Macoir, J., Plante, V., Bier, N., & Routhier, S. (2011). The specificity of notation codes in apraxic agraphia : Dissociation between Arabic and alphabetical scripts in a patient with severe ideomotor and visuoconstructional apraxia. *Neurocase*, 17(1), 11-23. <https://doi.org/10.1080/13554794.2010.487828>

Maeda, K., & Ogawa, N. (2011). Temporal lobe epilepsy manifesting as alexia with agraphia for kanji. *Epilepsy & Behavior*, 22(3), 592-595. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2011.07.037>

Maeda, K., & Ogawa, N. (2014). Agraphia for Kana Predominance Induced by a Cerebral Infarction Involving the Left Middle Frontal Gyrus (Exner's Area). *Undefined*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Agraphia-for-Kana-Predominance-Induced-by-a-the-Maeda-Ogawa/dd542a0cbc38609a86f7e7d2c5f4ae3fd3b812a5>

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. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2010.05.046>

Mangen, A., Anda, L. G., Oxenburgh, G. H., & Brønnick, K. (2015). Handwriting versus keyboard writing : Effect on word recall. *Journal of Writing Research*, 7(2), 227-247. <https://doi.org/10.17239/jowr-2015.07.02.1>

Manto, M., Bower, J. M., Conforto, A. B., Delgado-García, J. M., da Guarda, S. N. F., Gerwig, M., Habas, C., Hagura, N., Ivry, R. B., Mariën, P., Molinari, M., Naito, E., Nowak, D. A., Oulad Ben Taib, N.,

- Pelisson, D., Tesche, C. D., Tilikete, C., & Timmann, D. (2012). Consensus Paper : Roles of the Cerebellum in Motor Control—The Diversity of Ideas on Cerebellar Involvement in Movement. *The Cerebellum*, 11(2), 457-487. <https://doi.org/10.1007/s12311-011-0331-9>
- Margolin, D. I. (1984). The neuropsychology of Writing and Spelling : Semantic, Phonological, Motor, and Perceptual Processes. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 36(3), 459-489. <https://doi.org/10.1080/14640748408402172>
- Marian, V., Blumenfeld, H. K., & Kaushanskaya, M. (2007). The Language Experience and Proficiency Questionnaire (LEAP-Q) : Assessing Language Profiles in Bilinguals and Multilinguals. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 50(4), 940-967. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2007/067\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2007/067))
- 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. <https://doi.org/10.1212/01.wnl.0000267845.05041.41>
- Marquardt, C., Gentz, W., & Mai, N. (1996). On the role of vision in skilled handwriting. In *Handwriting and drawing research : Basic and applied issues* (In M. L. Simner, C. G. Leedham, A. J. W. M. Thomassen (Eds.), p. 87-97). Amsterdam: IOS Press.
- Mathôt, S., Schreij, D., & Theeuwes, J. (2012). OpenSesame : An open-source, graphical experiment builder for the social sciences. *Behavior Research Methods*, 44(2), 314-324. <https://doi.org/10.3758/s13428-011-0168-7>
- Mayer, C., Wallner, S., Budde-Spengler, N., Braunert, S., Arndt, P. A., & Kiefer, M. (2020). Literacy Training of Kindergarten Children With Pencil, Keyboard or Tablet Stylus : The Influence of the Writing Tool on Reading and Writing Performance at the Letter and Word Level. *Frontiers in Psychology*, 10, 3054. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.03054>
- 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), 375-407. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.88.5.375>
- Menichelli, A., Rapp, B., & Semenza, C. (2008). Allographic agraphia : A case study. *Cortex*, 44(7), 861-868. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2007.06.002>
- Meulenbroek, R. G. J., & Thomassen, A. J. W. M. (1991). Stroke-direction preferences in drawing and handwriting. *Human Movement Science*, 10(2-3), 247-270. [https://doi.org/10.1016/0167-9457\(91\)90006-J](https://doi.org/10.1016/0167-9457(91)90006-J)
- Meulenbroek, R. G. J., & van Galen, G. P. (1986). Movement Analysis of Repetitive Writing Behaviour of First, Second and Third Grade Primary School Children. In *Advances in Psychology* (Vol. 37, p. 71-92). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(09\)60073-X](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(09)60073-X)
- Meulenbroek, R. G. J., & Van Galen, G. P. (1989). The production of connecting strokes in cursive writing : Developing co-articulation in 8 to 12 year-old children. In *Computer recognition and human production of handwriting* (p. 273-286). World Scientific.

- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two : Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63(2), 81-97. <https://doi.org/10.1037/h0043158>
- Miozzo, M., & Caramazza, A. (1998). Varieties of pure alexia: the case of failure to access graphemic representations. *Cognitive Neuropsychology*, 15(1-2), 203-238. <https://doi.org/10.1080/026432998381267>
- Moeller, S., Yacoub, E., Olman, C. A., Auerbach, E., Strupp, J., Harel, N., & Uğurbil, K. (2010). Multiband multislice GE-EPI at 7 tesla, with 16-fold acceleration using partial parallel imaging with application to high spatial and temporal whole-brain fMRI. *Magnetic Resonance in Medicine*, 63(5), 1144-1153. <https://doi.org/10.1002/mrm.22361>
- Mojet, J. (1991). Development of graphic skills. In *Characteristics of the developing handwriting skill in elementary education*. (In Wann J., Wing A. M., Sovik N. (Eds.), p. 53-75). London: Academic Press.
- Mueller, P. A., & Oppenheimer, D. M. (2014). The Pen Is Mightier Than the Keyboard : Advantages of Longhand Over Laptop Note Taking. *Psychological Science*, 25(6), 1159-1168. <https://doi.org/10.1177/0956797614524581>
- Mur, M., Bandettini, P. A., & Kriegeskorte, N. (2009). Revealing representational content with pattern-information fMRI—an introductory guide. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 4(1), 101-109. <https://doi.org/10.1093/scan/nsn044>
- Nachev, P., Kennard, C., & Husain, M. (2008). Functional role of the supplementary and pre-supplementary motor areas. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(11), 856-869. <https://doi.org/10.1038/nrn2478>
- Nachshon, I. (1985). Directional Preferences in Perception of Visual Stimuli. *International Journal of Neuroscience*, 25(3-4), 161-174. <https://doi.org/10.3109/00207458508985369>
- Nakamura, K., Honda, M., Hirano, S., Oga, T., Sawamoto, N., Hanakawa, T., Inoue, H., Ito, J., Matsuda, T., Fukuyama, H., & 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. <https://doi.org/10.1162/089892902317205366>
- Nakamura, K., Kuo, W.-J., Pegado, F., Cohen, L., Tzeng, O. J. L., & Dehaene, S. (2012). Universal brain systems for recognizing word shapes and handwriting gestures during reading. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(50), 20762-20767. <https://doi.org/10.1073/pnas.1217749109>
- Nelson, J. R., Liu, Y., Fiez, J., & Perfetti, C. A. (2009). Assimilation and accommodation patterns in ventral occipitotemporal cortex in learning a second writing system. *Human Brain Mapping*, 30(3), 810-820. <https://doi.org/10.1002/hbm.20551>

Norman, K. A., Polyn, S. M., Detre, G. J., & Haxby, J. V. (2006). Beyond mind-reading : Multi-voxel pattern analysis of fMRI data. *Trends in Cognitive Sciences*, 10(9), 424-430. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2006.07.005>

Ogura, K., Fujii, T., Suzuki, K., & Mori, E. (2013). Pure agraphia in Romaji after left inferior frontal gyrus infarction : A case of selective deficit in syllable-to-grapheme conversion in Japanese. *Brain and Language*, 127(1), 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2013.06.004>

Olive, T., & Piolat, A. (2005). Le rôle de la mémoire de travail dans la production écrite de textes. *Psychologie Française*, 50(3), 373-390. <https://doi.org/10.1016/j.psfr.2005.05.002>

Omura, K., Tsukamoto, T., Kotani, Y., Ohgami, Y., & Yoshikawa, K. (2004). Neural correlates of phoneme-to-grapheme conversion. *Neuroreport*, 15(6), 949-953. <https://doi.org/10.1097/00001756-200404290-00004>

Otsuki, M., Soma, Y., Arihiro, S., Watanabe, Y., Moriwaki, H., & Naritomi, H. (2002). Dystypia : Isolated Typing Impairment without Aphasia, Apraxia or Visuospatial Impairment. *European Neurology*, 47(3), 136-140. <https://doi.org/10.1159/000047971>

Ouellette, G., & Tims, T. (2014). The write way to spell : Printing vs. typing effects on orthographic learning. *Frontiers in Psychology*, 5. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00117>

Paillard, J. (1990). Les bases nerveuses du contrôle visuo-manuel de l'écriture. In: C. Sirat, J. Irigoin and E. Poulie (Eds). *L'écriture: le cerveau, l'oeil et la main* (pp. 23-52). Paris: Brepols.

Palmis, S., Danna, J., Velay, J.-L., & Longcamp, M. (2017). Motor control of handwriting in the developing brain : A review. *Cognitive Neuropsychology*, 34(3-4), 187-204. <https://doi.org/10.1080/02643294.2017.1367654>

Palmis, S., Fabiani, E. & Longcamp, M. (2019). Bases cérébrales de l'écriture : orthographe et contrôle moteur de la production. *Revue de neuropsychologie*, 11, 168-175. <https://doi.org/10.1684/nrp.2019.0514>

Palmis, S., Velay, J.-L., Fabiani, E., Nazarian, B., Anton, J.-L., Habib, M., Kandel, S., & Longcamp, M. (2019b). The impact of spelling regularity on handwriting production : A coupled fMRI and kinematics study. *Cortex*, 113, 111-127. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.11.024>

Palmis, S., Velay, J.-L., Habib, M., Anton, J.-L., Nazarian, B., Sein, J., & Longcamp, M. (2021). The handwriting brain in middle childhood. *Developmental Science*. <https://doi.org/10.1111/DESC.13046>

Parkinson, J., & Khurana, B. (2007). Temporal Order of Strokes Primes letter Recognition. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 60(9), 1265-1274. <https://doi.org/10.1080/17470210600937460>

Paulesu, E., McCrory, E., Fazio, F., Menoncello, L., Brunswick, N., Cappa, S. F., Cotelli, M., Cossu, G., Corte, F., Lorusso, M., Pesenti, S., Gallagher, A., Perani, D., Price, C., Frith, C. D., & Frith, U. (2000). A

cultural effect on brain function. *Nature Neuroscience*, 3(1), 91-96. <https://doi.org/10.1038/71163>

Pavan, A., Cuturi, L. F., Maniglia, M., Casco, C., & Campana, G. (2011). Implied motion from static photographs influences the perceived position of stationary objects. *Vision Research*, 51(1), 187-194. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2010.11.004>

Peake, C., Diaz, A., & Artiles, C. (2017). Alphabet Writing and Allograph Selection as Predictors of Spelling in Sentences Written by Spanish-Speaking Children Who Are Poor or Good Keyboarders. *Journal of Learning Disabilities*, 50(5), 543-551. <https://doi.org/10.1177/0022219416642188>

Pegado, F., Nakamura, K., Cohen, L., & Dehaene, S. (2011). Breaking the symmetry: Mirror discrimination for single letters but not for pictures in the Visual Word Form Area. *NeuroImage*, 55(2), 742-749. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.11.043>

Pegado, F., Nakamura, K., & Hannagan, T. (2014). How does literacy break mirror invariance in the visual system? *Frontiers in Psychology*, 5. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00703>

Pelli, D. G., Palomares, M., & Majaj, N. J. (2004). Crowding is unlike ordinary masking: Distinguishing feature integration from detection. *Journal of Vision*, 4(12), 12. <https://doi.org/10.1167/4.12.12>

Perfetti, C. A., Liu, Y., Fiez, J., Nelson, J., Bolger, D. J., & Tan, L.-H. (2007). Reading in two writing systems: Accommodation and assimilation of the brain's reading network. *Bilingualism: Language and Cognition*, 10(2), 131-146. <https://doi.org/10.1017/S1366728907002891>

Perfetti, C., Cao, F., & Booth, J. (2013). Specialization and Universals in the Development of Reading Skill: How Chinese Research Informs a Universal Science of Reading. *Scientific Studies of Reading*, 17(1), 5-21. <https://doi.org/10.1080/10888438.2012.689786>

Perrier, J. F. (2013). Encadrement de l'excitabilité des motoneurones par la sérotonine. *médecine/sciences*, 29(6-7), 564-566. <https://doi.org/10.1051/medsci/2013296003>

Pick, H. L., & Teulings, H.-L. (1983). Geometric transformations of handwriting as a function of instruction and feedback. *Acta Psychologica*, 54(1-3), 327-340. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(83\)90044-6](https://doi.org/10.1016/0001-6918(83)90044-6)

Pinet, S., Hamamé, C. M., Longcamp, M., Vidal, F., & Alario, F.-X. (2015). Response planning in word typing: Evidence for inhibition: Response planning in word typing. *Psychophysiology*, 52(4), 524-531. <https://doi.org/10.1111/psyp.12373>

Pinet S., Zielinski, C., Alario, F.-X. & Longcamp, M..Typing expertise in a large student population. (in press).

Plamondon, R. (1995a). A kinematic theory of rapid human movements: Part I. Movement representation and generation. *Biological Cybernetics*, 72(4), 295-307. <https://doi.org/10.1007/BF00202785>

Plamondon, R. (1995b). A kinematic theory of rapid human movements : Part II. Movement time and control. *Biological Cybernetics*, 72(4), 309-320. <https://doi.org/10.1007/BF00202786>

Plamondon, R., O'Reilly, C., Galbally, J., Almaksour, A., & Anquetil, É. (2014). Recent developments in the study of rapid human movements with the kinematic theory : Applications to handwriting and signature synthesis. *Pattern Recognition Letters*, 35, 225-235. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2012.06.004>

Planton, S., Jucla, M., Roux, F.-E., & Démonet, J.-F. (2013). The “handwriting brain” : A meta-analysis of neuroimaging studies of motor versus orthographic processes. *Cortex*, 49(10), 2772-2787. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2013.05.011>

Planton, S., & Kandel, S. (2016). Substrats cérébraux de la production du langage écrit. In: S. Pinto & M. Sato. (Eds). *Traité de Neurolinguistique* (pp. 183-196). Bruxelles : De Boeck.

Planton, S., Longcamp, M., Péran, P., Démonet, J.-F., & Jucla, M. (2017). How specialized are writing-specific brain regions? An fMRI study of writing, drawing and oral spelling. *Cortex*, 88, 66-80. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.11.018>

Pleau, J., & Lavoie, N. (2016). Crayon ou clavier ? Effets de l'outil d'écriture sur les performances graphomotrices et rédactionnelles d'élèves de sixième année. *Revue de recherches en littérature médiatique multimodale*, 3. <https://doi.org/10.7202/1047130ar>

Podgorny, P., & Garner, W. R. (1979). Reaction time as a measure of inter- and intraobject visual similarity: Letters of the alphabet. *Perception & Psychophysics*, 26(1), 37-52. <https://doi.org/10.3758/BF03199860>

Polk, T. A., Stallcup, M., Aguirre, G. K., Alsop, D. C., D'Esposito, M., Detre, J. A., & Farah, M. J. (2002). Neural Specialization for Letter Recognition. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(2), 145-159. <https://doi.org/10.1162/089892902317236803>

Power, Jonathan D., Anish Mitra, Timothy O. Laumann, Abraham Z. Snyder, Bradley L. Schlaggar, and Steven E. Petersen. 2014. “Methods to Detect, Characterize, and Remove Motion Artifact in Resting State fMRI.” *NeuroImage* 84 (Supplement C): 320–41. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.08.048>.

Preminger, F., (Tamar) Weiss, P. L., & Weintraub, N. (2004). Predicting Occupational Performance : Handwriting Versus Keyboarding. *The American Journal of Occupational Therapy*, 58(2), 193-201. <https://doi.org/10.5014/ajot.58.2.193>

Price, C. J., & Devlin, J. T. (2011). The Interactive Account of ventral occipitotemporal contributions to reading. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(6), 246-253. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.04.001>

Purcell, J. J., Napoliello, E. M., & Eden, G. F. (2011b). A combined fMRI study of typed spelling and reading. *NeuroImage*, 55(2), 750-762. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.11.042>

Purcell, J. J., Turkeltaub, P. E., Eden, G. F., & Rapp, B. (2011a). Examining the Central and Peripheral Processes of Written Word Production Through Meta-Analysis. *Frontiers in Psychology*, 2. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00239>

Qiao, E., Vinckier, F., Szwed, M., Naccache, L., Valabrègue, R., Dehaene, S., & Cohen, L. (2010). Unconsciously deciphering handwriting: Subliminal invariance for handwritten words in the visual word form area. *NeuroImage*, 49(2), 1786-1799. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.09.034>

Rajan, A., Meyyappan, S., Liu, Y., Samuel, I. B. H., Nandi, B., Mangun, G. R., & Ding, M. (2021). The Microstructure of Attentional Control in the Dorsal Attention Network. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 33(6), 965-983. https://doi.org/10.1162/jocn_a_01710

Ramus, F. (2003). The Neural Basis of Reading Acquisition. *The Cognitive Neurosciences*.

Rapcsak, S. Z., & Beeson, P. M. (2015). Neuroanatomical correlates of spelling and writing. In A. E. Hillis (Ed.), *The handbook of adult language disorders*. pp. 87–116. Psychology Press.

Rapcsak, S. Z., & Beeson, P. (2000). Agraphia. In *Aphasia and language: Theory and practice*. In L. J. G. Rothi, B. Crosson, S. Nadeau (Eds.), p. 184-220.

Rapp, B., & Caramazza, A. (1997). From graphemes to abstract letter shapes: Levels of representation in written spelling. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23(4), 1130-1152. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.23.4.1130>

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. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00109

Rapp, B., & Fischer-Baum, S. (2015). Uncovering the cognitive architecture of spelling. In *The handbook of adult language disorders* (pp. 75-102). Psychology Press.

Rayner, K., Binder, K. S., Ashby, J., & Pollatsek, A. (2001). Eye movement control in reading: Word predictability has little influence on initial landing positions in words. *Vision Research*, 41(7), 943-954. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(00\)00310-2](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(00)00310-2)

Riesenhuber, M., & Poggio, T. (1999). Hierarchical models of object recognition in cortex. *Nature Neuroscience*, 2(11), 1019-1025. <https://doi.org/10.1038/14819>

Roll, J. P., & Gilhodes, J. C. (1995). Proprioceptive sensory codes mediating movement trajectory perception: Human hand vibration-induced drawing illusions. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 73(2), 295-304. <https://doi.org/10.1139/y95-040>

Roll, J.-P., Albert, F., Thyriion, C., Ribot-Ciscar, E., Bergenheim, M., & Mattei, B. (2009). Inducing Any Virtual Two-Dimensional Movement in Humans by Applying Muscle Tendon Vibration. *Journal of Neurophysiology*, 101(2), 816-823. <https://doi.org/10.1152/jn.91075.2008>

Roman, G., & Pavard, B. (1987). A comparative study : how we read in arabic and french. In *Eye Movements from Physiology to Cognition* (p. 431-440). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-70113-8.50064-3>

Rothlein, D., & Rapp, B. (2014). The similarity structure of distributed neural responses reveals the multiple representations of letters. *NeuroImage*, 89, 331-344. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.11.054>

Rothlein, D., & Rapp, B. (2017). The role of allograph representations in font-invariant letter identification. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 43(7), 1411-1429. <https://doi.org/10.1037/xhp0000384>

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 : Graphemic/Motor Frontal Area. *Annals of Neurology*, 66(4), 537-545. <https://doi.org/10.1002/ana.21804>

Rueckl, J. G., Paz-Alonso, P. M., Molfese, P. J., Kuo, W.-J., Bick, A., Frost, S. J., Hancock, R., Wu, D. H., Mencl, W. E., Duñabeitia, J. A., Lee, J.-R., Oliver, M., Zevin, J. D., Hoeft, F., Carreiras, M., Tzeng, O. J. L., Pugh, K. R., & Frost, R. (2015). Universal brain signature of proficient reading : Evidence from four contrasting languages. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(50), 15510-15515. <https://doi.org/10.1073/pnas.1509321112>

Rumelhart, D. E., & Norman, D. A. (1982). Simulating a Skilled Typist : A Study of Skilled Cognitive-Motor Performance. *Cognitive Science*, 6(1), 1-36. https://doi.org/10.1207/s15516709cog0601_1

Ryu, D.-W., Kim, J.-S., Yang, D.-W., Kim, Y.-I., & Lee, K.-S. (2012). Dystypia Without Aphasia Associated With Visuospatial Memory Impairment in a Patient With Acute Stroke. *Alzheimer Disease & Associated Disorders*, 26(3), 285-288. <https://doi.org/10.1097/WAD.0b013e318231e614>

Saiegh-Haddad, E. (2003). Linguistic distance and initial reading acquisition : The case of Arabic diglossia. *Applied Psycholinguistics*, 24(3), 431-451. <https://doi.org/10.1017/S0142716403000225>

Saiegh-Haddad, E., & Ghawi-Dakwar, O. (2017). Impact of Diglossia on Word and Non-word Repetition among Language Impaired and Typically Developing Arabic Native Speaking Children. *Frontiers in Psychology*, 8, 2010. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.02010>

Sakurai, Y., Asami, M., & Mannen, T. (2010). Alexia and agraphia with lesions of the angular and supramarginal gyri : Evidence for the disruption of sequential processing. *Journal of the Neurological Sciences*, 288(1-2), 25-33. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2009.10.015>

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. <https://doi.org/10.1155/2007/906417>

Sakurai, Y., Sakai, K., Sakuta, M., & Iwata, M. (1994). Naming difficulties in alexia with agraphia for kanji after a left posterior inferior temporal lesion. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 57(5), 609-613. <https://doi.org/10.1136/jnnp.57.5.609>

Satterthwaite, Theodore D., Mark A. Elliott, Raphael T. Gerraty, Kosha Ruparel, James Loughhead, Monica E. Calkins, Simon B. Eickhoff, et al. 2013. "An improved framework for confound regression and filtering for control of motion artifact in the preprocessing of resting-state functional connectivity data." *NeuroImage* 64 (1): 240-56. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.08.052>.

Schmidt, R. A. (1976). The Schema as a Solution to Some Persistent Problems in Motor Learning Theory. In *Motor Control* (p. 41-65). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-665950-4.50007-9>

Schott, G. D. (2007). Mirror writing : Neurological reflections on an unusual phenomenon. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 78(1), 5-13. <https://doi.org/10.1136/jnnp.2006.094870>

Schubert, T., & McCloskey, M. (2013). Prelexical representations and processes in reading : Evidence from acquired dyslexia. *Cognitive Neuropsychology*, 30(6), 360-395. <https://doi.org/10.1080/02643294.2014.880677>

Schubert, T., Reilhac, C., & McCloskey, M. (2018). Knowledge about writing influences reading : Dynamic visual information about letter production facilitates letter identification. *Cortex*, 103, 302-315. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.03.020>

Schubert, T., & Maass, A. (Éds.). (2011). *Spatial Dimensions of Social Thought*: DE GRUYTER. <https://doi.org/10.1515/9783110254310>

Schubotz, R. I., & von Cramon, D. Y. (2001). Functional organization of the lateral premotor cortex : FMRI reveals different regions activated by anticipation of object properties, location and speed. *Cognitive Brain Research*, 11(1), 97-112. [https://doi.org/10.1016/S0926-6410\(00\)00069-0](https://doi.org/10.1016/S0926-6410(00)00069-0)

Selfridge, O. (1959). *Pandemonium: A Paradigm for Learning, Proceedings of Symposium on the Mechanization of Thought Processes*. National Physics Laboratory, Teddington.

Selfridge, O., & Neisser, U. (1960). Pattern recognition by machine. *Scientific American*, 203(2), 60-69.

Séraphin Thibon, L., Barbier, G., Vilain, C., Sawallis, T. R., Gerber, S., & Kandel, S. (2019). Investigating how children produce rotation and pointing movements when they learn to write letters. *Human Movement Science*, 65, 15-29. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2018.04.008>

Seyll, L., Wyckmans, F., & Content, A. (2020). The impact of graphic motor programs and detailed visual analysis on letter-like shape recognition. *Cognition*, 205, 104443. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2020.104443>

Shaffer, L. H. (1975). Control Processes in Typing. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 27(3), 419-432. <https://doi.org/10.1080/14640747508400502>

- Share, D. L. (1995). Phonological recoding and self-teaching : Sine qua non of reading acquisition. *Cognition*, 55(2), 151-218. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(94\)00645-2](https://doi.org/10.1016/0010-0277(94)00645-2)
- Smyth, M. M. (1989). Visual control of movement patterns and the grammar of action. *Acta Psychologica*, 70(3), 253-265. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(89\)90025-5](https://doi.org/10.1016/0001-6918(89)90025-5)
- Smyth, M. M., & Silvers, G. (1987). Functions of vision in the control of handwriting. *Acta Psychologica*, 65(1), 47-64. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(87\)90046-1](https://doi.org/10.1016/0001-6918(87)90046-1)
- Snyder, K. M., Ashitaka, Y., Shimada, H., Ulrich, J. E., & Logan, G. D. (2014). What skilled typists don't know about the QWERTY keyboard. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 76(1), 162-171. <https://doi.org/10.3758/s13414-013-0548-4>
- Soppelsa, R., & Albaret, J. M. (2012). Evaluation de l'écriture chez l'adolescent. Le BHK Ado. *Entretiens de Psychomotricité*, 66-76.
- Sormunen, C. (1993). Learning Style : An Analysis of Factors Affecting Keyboarding Achievement of Elementary School Students. *Delta Pi Epsilon Journal*, 35(1), 26-38.
- Spilling, E. F., Rønneberg, V., Rogne, W. M., Roeser, J., & Torrance, M. (2021). Handwriting versus keyboarding : Does writing modality affect quality of narratives written by beginning writers? *Reading and Writing*. <https://doi.org/10.1007/s11145-021-10169-y>
- Sprenger-Charolles, L., & Ziegler, J. C. (2019). Apprendre à lire: contrôle, automatismes et auto-apprentissage.
- Starrfelt, R. (2007). Selective alexia and agraphia sparing numbers—A case study. *Brain and Language*, 102(1), 52-63. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2006.09.005>
- Sugihara, G., Kaminaga, T., & Sugishita, M. (2006). Interindividual uniformity and variety of the "Writing center": A functional MRI study. *NeuroImage*, 32(4), 1837-1849. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.05.035>
- Sweller, J., Ayres, P., & Kalyuga, S. (2011). *Cognitive Load Theory*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8126-4>
- Szczepanski, S. M., Pinsk, M. A., Douglas, M. M., Kastner, S., & Saalmann, Y. B. (2013). Functional and structural architecture of the human dorsal frontoparietal attention network. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(39), 15806-15811. <https://doi.org/10.1073/pnas.1313903110>
- Szwed, M., Qiao, E., Jobert, A., Dehaene, S., & Cohen, L. (2014). Effects of Literacy in Early Visual and Occipitotemporal Areas of Chinese and French Readers. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 26(3), 459-475. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00499
- Tahhan, B., Klibi-Seassau, I., Mlih, F., Primus, C., Sicard-Fraisse, F. & Tahhan, B. (2005). *Kullo Tamâm Arabe palier 1*. Edition Delagrave. ISBN: 978-2-206-08748-1

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. <https://doi.org/10.1002/hbm.20134>

Tan, L. H., Spinks, J. A., Feng, C.-M., Siok, W. T., Perfetti, C. A., Xiong, J., Fox, P. T., & Gao, J.-H. (2003). Neural systems of second language reading are shaped by native language. *Human Brain Mapping*, 18(3), 158-166. <https://doi.org/10.1002/hbm.10089>

Teasdale, N., Forget, R., Bard, C., Paillard, J., Fleury, M., & Lamarre, Y. (1993). The role of proprioceptive information for the production of isometric forces and for handwriting tasks. *Acta Psychologica*, 82(1-3), 179-191. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(93\)90011-F](https://doi.org/10.1016/0001-6918(93)90011-F)

Testolin, A., Stoianov, I., & Zorzi, M. (2017). Letter perception emerges from unsupervised deep learning and recycling of natural image features. *Nature Human Behaviour*, 1(9), 657-664. <https://doi.org/10.1038/s41562-017-0186-2>

Teulings, H.-L., Thomassen, A. J., & van Galen, G. P. (1986). Invariants in handwriting : The information contained in a motor program. In *Advances in psychology* (Vol. 37, p. 305-315). Elsevier.

Theobald, E. (2018). Students Are Rarely Independent : When, Why, and How to Use Random Effects in Discipline-Based Education Research. *CBE—Life Sciences Education*, 17(3), rm2. <https://doi.org/10.1187/cbe.17-12-0280>

Thomassen, A. J. W. M., & van Galen, G. P. (1992). Chapter 4 Handwriting as A Motor Task : Experimentation, Modelling, and Simulation. In *Advances in Psychology* (Vol. 84, p. 113-144). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)61684-2](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)61684-2)

Torres, A. R., Mota, N. B., Adamy, N., Naschold, A., Lima, T. Z., Copelli, M., Weissheimer, J., Pegado, F., & Ribeiro, S. (2021). Selective Inhibition of Mirror Invariance for Letters Consolidated by Sleep Doubles Reading Fluency. *Current Biology*, 31(4), 742-752.e8. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.11.031>

Trageton, A. (2010). Writing to read. Playful computer writing. *Association for Teacher Education in Europe Winter Conference*.

Treiman, R., & Kessler, B. (2014). *How children learn to write words*. Oxford University Press.

Tse, P. U., & Cavanagh, P. (2000). Chinese and Americans see opposite apparent motions in a Chinese character. *Cognition*, 74(3), B27-B32. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(99\)00065-7](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(99)00065-7)

Tustison, N. J., B. B. Avants, P. A. Cook, Y. Zheng, A. Egan, P. A. Yushkevich, and J. C. Gee. 2010. "N4ITK: Improved N3 Bias Correction." *IEEE Transactions on Medical Imaging* 29 (6): 1310–20. <https://doi.org/10.1109/TMI.2010.2046908>.

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. *Journal of Neuroscience*, 26(33), 8523-8530. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0846-06.2006>

Usanova, I. (2019). *Biscriptuality : Writing skills among German-Russian adolescents* (Vol. 8). John Benjamins Publishing Company. <https://doi.org/10.1075/hsld.8>

van Doorn, R. R. A., & Keuss, P. J. G. (1992). The role of vision in the temporal and spatial control of handwriting. *Acta Psychologica*, 81(3), 269-286. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(92\)90021-5](https://doi.org/10.1016/0001-6918(92)90021-5)

van Doorn, R. R. A., & Keuss, P. J. G. (1993). Does the production of letter strokes in handwriting benefit from vision? *Acta Psychologica*, 82(1-3), 275-290. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(93\)90016-K](https://doi.org/10.1016/0001-6918(93)90016-K)

van Galen, G. P. (1980). 35 Handwriting and Drawing : A Two Stage Model of Complex Motor Behavior. In *Advances in Psychology* (Vol. 1, p. 567-578). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)61970-6](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)61970-6)

van Galen, G. P. (1991). Handwriting : Issues for a psychomotor theory. *Human Movement Science*, 10(2-3), 165-191. [https://doi.org/10.1016/0167-9457\(91\)90003-G](https://doi.org/10.1016/0167-9457(91)90003-G)

van Sommers, P. (1984). *Drawing and Cognition : Descriptive and Experimental Studies of Graphic Production Processes* (1^{re} éd.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511897672>

Velay, J.-L. & Longcamp, M. (2005). *Clavier ou stylo, comment apprendre à écrire ?* cerveauetpsycho.fr; Pour la Science.

Velay, J.-L., Longcamp, M. et Zerbato-Poudou M.-T. (2004). De la plume au clavier : Est-il toujours utile d'enseigner l'écriture manuscrite ?. In E. Gentaz & P. Dessu (Eds.), *Comprendre les apprentissages : Sciences cognitives et éducation* (pp 69-82). Paris :Dunod.

Versace, R., Vallet, G. T., Riou, B., Lesourd, M., Labeye, É., & Brunel, L. (2014). Act-In : An integrated view of memory mechanisms. *Journal of Cognitive Psychology*, 26(3), 280-306. <https://doi.org/10.1080/20445911.2014.892113>

Vinci-Booher S, James KH. Ecological validity of experimental set-up affects parietal involvement during letter production. *Neurosci Lett*. 2020 Jul 13;731:134920. doi: 10.1016/j.neulet.2020.134920. Epub 2020 Apr 6. PMID: 32272143; PMCID: PMC8015435.

Vinci-Booher, S., James, T. W., & James, K. H. (2016). Visual-motor functional connectivity in preschool children emerges after handwriting experience. *Trends in Neuroscience and Education*, 5(3), 107-120. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2016.07.006>

Vinci-Booher, S., James, T. W., & James, K. H. (2021). Visual-motor contingency during symbol production contributes to short-term changes in the functional connectivity during symbol perception and long-term gains in symbol recognition. *NeuroImage*, 227, 117554. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.117554>

Vossel, S., Geng, J. J., & Fink, G. R. (2014). Dorsal and Ventral Attention Systems : Distinct Neural Circuits but Collaborative Roles. *The Neuroscientist*, 20(2), 150-159. <https://doi.org/10.1177/1073858413494269>

- Wagner, D. A., Spratt, J. E., & Ezzaki, A. (1989). Does learning to read in a second language always put the child at a disadvantage? Some counterevidence from Morocco. *Applied Psycholinguistics*, 10(1), 31-48. <https://doi.org/10.1017/S0142716400008407>
- Weaverdyck, M. E., Lieberman, M. D., & Parkinson, C. (2020). Tools of the Trade Multivoxel pattern analysis in fMRI : A practical introduction for social and affective neuroscientists. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 15(4), 487-509. <https://doi.org/10.1093/scan/nsaa057>
- Wiley, R. W., & Rapp, B. (2021). The Effects of Handwriting Experience on Literacy Learning. *Psychological Science*, 32(7), 1086-1103. <https://doi.org/10.1177/0956797621993111>
- Wiley, R. W., Wilson, C., & Rapp, B. (2016). The effects of alphabet and expertise on letter perception. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 42(8), 1186-1203. <https://doi.org/10.1037/xhp0000213>
- Wolpert, D. M., Diedrichsen, J., & Flanagan, J. R. (2011). Principles of sensorimotor learning. *Nat Rev Neurosci*, 12(12), 739-751. <https://doi.org/10.1038/nrn3112>
- Wolpert, D. M., & Ghahramani, Z. (2000). Computational principles of movement neuroscience. *Nature Neuroscience*, 3(S11), 1212-1217. <https://doi.org/10.1038/81497>
- Wolpert, D. M., Ghahramani, Z., & Jordan, M. I. (1995). An Internal Model for Sensorimotor Integration. *Science*, 269(5232), 1880-1882. <https://doi.org/10.1126/science.7569931>
- Wolpert, D. M., Goodbody, S. J., & Husain, M. (1998). Maintaining internal representations : The role of the human superior parietal lobe. *Nature Neuroscience*, 1(6), 529-533. <https://doi.org/10.1038/2245>
- Wong, A. C.-N., Jobard, G., James, K. H., James, T. W., & Gauthier, I. (2009). Expertise with characters in alphabetic and nonalphabetic writing systems engage overlapping occipito-temporal areas. *Cognitive Neuropsychology*, 26(1), 111-127. <https://doi.org/10.1080/02643290802340972>
- Wong, K., Wade, F., Ellenblum, G., & McCloskey, M. (2018). The devil's in the g-tails : Deficient letter-shape knowledge and awareness despite massive visual experience. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 44(9), 1324-1335. <https://doi.org/10.1037/xhp0000532>
- Wu, C.-Y., Ho, M.-H. R., & Chen, S.-H. A. (2012). A meta-analysis of fMRI studies on Chinese orthographic, phonological, and semantic processing. *NeuroImage*, 63(1), 381-391. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.06.047>
- Xu, M., Baldauf, D., Chang, C. Q., Desimone, R., & Tan, L. H. (2017). Distinct distributed patterns of neural activity are associated with two languages in the bilingual brain. *Science Advances*, 3(7), e1603309. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1603309>
- Xu, Z., Liu, D., & Joshi, R. M. (2020). The influence of sensory-motor components of handwriting on Chinese character learning in second- and fourth-grade Chinese children. *Journal of Educational Psychology*, 112(7), 1353-1366. <https://doi.org/10.1037/edu0000443>

- Yang, Y., Zuo, Z., Tam, F., Graham, S. J., Tao, R., Wang, N., & Bi, H.-Y. (2019). Brain activation and functional connectivity during Chinese writing : An fMRI study. *Journal of Neurolinguistics*, 51, 199-211. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2019.03.002>
- Yokota, T., Ishiai, S., Furukawa, T., & Tsukagoshi, H. (1990). Pure agraphia of kanji due to thrombosis of the Labbe vein. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 53(4), 335-338. <https://doi.org/10.1136/jnnp.53.4.335>
- Younes, C., Matta Abizeid, C., Albaret, J.-M., & Velay, Jean-luc. (2018). Studying handwriting in a bilingual and bigraphic Arabic-French setting. *ANAE - Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant*, 30, 209-216.
- Younes-Harb, C., Haddad, G., Fabiani, E., Danna, J., Albaret, J.M., Velay, J.L. & Abizied, C. *Comparing handwriting of monographs in Arabic and French to that of Arabic/French bigraphs*, in preparation.
- Younes- Harb, C. Y., Velay, J.-L. & Albaret, J.-M., (2016). Étude comportementale de l'écriture chez des sujets adultes dans le cadre du bigraphisme. *Les entretiens de Psychomotricité 2016 (pp. 52-58)*.
- Yu, T.-Y., Hinojosa, J., Howe, T.-H., & Voelbel, G. T. (2012). Contribution of Tactile and Kinesthetic Perceptions to Handwriting in Taiwanese Children in First and Second Grade. *OTJR: Occupation, Participation and Health*, 32(3), 87-94. <https://doi.org/10.3928/15394492-20111209-02>
- Zemlock, D., Vinci-Booher, S., & James, K. H. (2018). Visual-motor symbol production facilitates letter recognition in young children. *Reading and Writing*, 31(6), 1255-1271. <https://doi.org/10.1007/s11145-018-9831-z>
- Zesiger, P. (1995). *Écrire. Approches cognitive, neuropsychologique et développementale (1. éd.)*. Presses Universitaires de France; Cairn.info. <https://www.cairn.info/ecrire--9782130467724.htm>
- Zesiger, P. (2003). Acquisition et troubles de l'écriture. *Enfance*, 55(1), 56. <https://doi.org/10.3917/enf.551.0056>
- Zesiger, P., Deonna, T., & Mayor, C. (2000). L'acquisition de l'écriture. *Enfance*, 53(3), 295-304.
- Zhang, Y., M. Brady, and S. Smith. 2001. "Segmentation of Brain MR Images Through a Hidden Markov Random Field Model and the Expectation-Maximization Algorithm." *IEEE Transactions on Medical Imaging* 20 (1): 45-57. <https://doi.org/10.1109/42.906424>.
- Ziegler, J. C., & Goswami, U. (2005). Reading Acquisition, Developmental Dyslexia, and Skilled Reading Across Languages : A Psycholinguistic Grain Size Theory. *Psychological Bulletin*, 131(1), 3-29. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.131.1.3>
- Ziegler, J. C., Perry, C., & Zorzi, M. (2014). Modelling reading development through phonological decoding and self-teaching : Implications for dyslexia. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369(1634), 20120397. <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0397>

Ziegler, J. C., Perry, C., & Zorzi, M. (2019). Modeling the Variability of Developmental Dyslexia. In L. Verhoeven, C. Perfetti, & K. Pugh (Éds.), *Developmental Dyslexia across Languages and Writing Systems* (1^{re} éd., p. 350-371). Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/9781108553377.016>

Annexes

Annexe 1 : Tableau résumé des études comparant l'écriture manuscrite à l'écriture au clavier pendant l'apprentissage de nouveaux caractères

Annexe 2 : Exemple du ROC réalisé par un élève

Annexe 3 : Exemple du BHK réalisé par un élève

Annexe 4 : Exemple du questionnaire rempli par un élève

Annexe 5 : Matériel utilisé dans les tâches de copie

Annexe 6 : Matériel utilisé dans allo-lettre

Annexe 7 : Matériel utilisé dans miroir-lettre

Annexe 8 : Matériel utilisé dans lecture-mot

Annexe 9 : Résultats : figures complémentaires

Annexe 10 : Principales caractéristiques motrices des lettres utilisées dans l'étude en IRMf définies sur l'études préliminaire comportementale.

Annexe 11 : Caractéristiques visuelles des lettres utilisées dans l'étude en IRMf.

Annexe 12 : Détail des prétraitement réalisés pour l'analyse MVPA

Annexe 1 : Tableau résumé des études comparant l'apprentissage de nouveaux caractères, en les écrivant à la main ou au clavier.

Abréviations :

- MAN : écriture manuscrite
- CLA : écriture au clavier

- Pas de phono : l'entraînement n'impliquait pas d'aspect auditif.

- 4FC : test de reconnaissance visuelle d'un item correct parmi 3 faux.

- PMd : cortex PréMoteur dorsal
- FuG : Girus Fusiforme
- IFG : Gyrus inférieur frontal
- AAC : Cortex Cingulaire Antérieur
- SPL : Lobule Pariétal Supérieur
- IPL : Lobule Pariétal Inférieur

	Longcamp Zerbato-Poudou & Velay, 2005	Longcamp, Boucard, Gilhodes & Velay, 2006	Longcamp, Boucard, Gilhodes, Anton, Roth, Nazarian & Velay, 2008
Participants	76 enfants (3-5 ans) répartis dans 3 groupes d'âge Français	12 adultes Français	12 adultes Français
Apprentissage	Manuscrit Clavier (Inter)	Manuscrit Clavier (Intra)	Manuscrit Clavier (Intra)
Apprentissage (stimuli)	12 lettres latines majuscules	20 lettres issues du Bengali et Gujarati (10/condition)	20 lettres issues du Bengali et Gujarati (10/condition)
Apprentissage (durée)	30min/semaine 3 semaines	1h/semaine 3 semaines	1h/semaine 3 semaines
Apprentissage (tâche)	- Recopier les stimuli - Pas de phono	- Recopier les stimuli (20 x session) - Pas de phono	- Recopier les stimuli (20 x session) - Pas de phono
Tests	Reconnaissance visuelle (4FC)	Reconnaissance visuelle (jugement miroir/normal) Bas niveau visuel (jugement pareil/différent)	Comportement : Reconnaissance visuelle (jugement miroir/normal) rappel moteur (fin expérimentation) IRM : Reconnaissance visuelle (jugement miroir/normal) <i>+ 10 lettres latines minuscules</i>
Test (moment)	- Pré test - Post test immédiat - Post test 1 semaine	-Post test immédiat -Post test 1 semaine -Post test 3 semaines	Comportement : - Post test immédiat - Post test 1 semaine - Post test 3 semaines - Post test 5 semaines IRM : - Post test 1 semaine
Résultats comportement	Reconnaissance visuelle : MAN>CLA chez plus âgés en post-test immédiat et après une semaine	Reconnaissance visuelle : CLA diminue en fonction des sessions de test alors que MAN reste stable	Reconnaissance visuelle : MAN> CLA qui diminue au fur et à mesure des post-tests.
Résultats IRM	-	-	MAN >CLA : PMd gauche, gyrus post-central gauche et lobules pariétaux inférieur bilatéraux, médial postérieure régions bilatérales et Broca CLA>MAN : Profil d'activation similaire

	James & Atwood, 2009	Guan, Liu, Chan, Ye & Perfetti, 2011 (exp2)
Participants	18 adultes Américains (Etats-Unis)	37 adultes qui connaissent déjà entre 50 et 150 caractères chinois
Apprentissage	Manuscrit Clavier Vision (Inter)	Manuscrit Clavier (pinyin) (Inter)
Apprentissage (stimuli)	18 pseudo-lettres	30 caractères chinois nouveaux (10/condition)
Apprentissage (durée)	1 entraînement/jour 2 jours	1 entraînement/jour 2 jours J1 : MAN / CLA J2 : MAN/MAN
Apprentissage (tâche)	- Recopier/Regarder les stimuli (12 x session) - Pas de phono	- Recopier les stimuli (3xsession) CLA doit produire le mot en pinyin depuis la forme phono (3 essais avec feedback) - Présentation visuelle + son + traduction anglaise
Tests	Comportement : Reconnaissance visuelle (appris/non-appris) Bas niveau : recherche parmi distracteur (avec un modèle), jugement pareil/différent (avec rotation et police) IRM : Dire si 2 lettres à la suite sont les mêmes (peu importe la police et l'orientation) <i>+ 18 lettres et 18 pseudo-lettres non-apprises (différente police et différente rotation)</i>	Reconnaissance visuelle (jugement appris/non-appris) Dictée en pinyin Traduire en anglais depuis modèle visuel et auditif
Test (moment)	Comportement : - Pré test - Post test jour 1 - Post test jour 2 IRM : - Pré test - Post-test (immédiat)	- Pré test - Post test lendemain jour 1 - Post test lendemain jour 2
Résultats comportement	Reconnaissance visuelle : Pas de différence entre les modalités d'apprentissage	Reconnaissance visuelle et traduction depuis visuel : MAN > CLA Phono depuis visuel et traduction depuis phono (après Jour 1) : CLA > MAN
Résultats IRM	MAN > CLA : FuG postérieur gauche et gyrus précentral dorsal gauche CLA > MAN : Profil d'activation similaire	-

	James & Engelhardt 2012	Cao, Vu, Chan, Lawrence, Harris, Guan, Xu, Perfetti, 2013
Participants	15 enfants (4-5ans) Américains	17 adultes L1 anglais
Apprentissage	Manuscrit Clavier Trace (copie sur un modèle) (Intra)	Manuscrit Clavier (pinyin) (Intra)
Apprentissage (stimuli)	12 lettres latines majuscules 12 formes simples (4/condition)	60 caractères chinois (30/condition)
Apprentissage (durée)	1x30 minutes	1 entraînement/jour 3-5 jours
Apprentissage (tâche)	- Recopier les stimuli (8xsession) - Pas de phono	- Recopier les stimuli (1xsession) - Présentation visuelle + visuel pinyin + son + traduction anglaise
Tests	IRM : Vision passive des lettres et formes (en bloc selon le mode d'apprentissage) <i>+ 12 lettres et 12 formes non-apprises</i>	Comportement : Reconnaissance visuelle (appris/non-appris) Ecrire en pinyin (à la main)* Traduire en anglais* * que pour le post test IRM : Vision passive (tous les stim) Jugement appris/non-appris Ecriture imaginée (les 90 caractères chinois) <i>+ 30 caractères non-appris + 30 mots anglais</i>
Test (moment)	- Post test immédiat	Comportement : - Pré test - Après chaque entraînement - Post test immédiat IRM : - post test (dans la semaine suivant le dernier entraînement)
Résultats comportement	-	Reconnaissance visuelle (pendant et post test) MAN > CLA Ecriture du pinyin et traduction : pas de différence
Résultats IRM	MAN > CLA : FuG gauche, l'IFG gauche (Broca) et ACC gauche CLA > MAN : Profil d'activation similaire	Jugement appris/non-appris : - MAN>CLA dans SPL bilatéral, IPL droit et gyrus post-central - CLA>MAN : dans IFG droit Ecriture imaginé : MAN> CLA dans gyrus lingual bilatéral, gyrus temporal moyen, IPL gauche, gyrus frontal supérieur/moyen gauche et gyrus précentral CLA>MAN : Profil d'activation similaire

	Kiefer, Shuler, Mayer, Trumpp, Hille, Sachse, 2015	Vinci-Booher, James, James 2016	Mayer, Walner, Budde-Spengler, Braunert, Arndt, Kiefer, 2020
Participants	23 enfants (4-6 ans) Allemands	11 enfants (4-6ans) Américains	145 enfants (4-6ans) Allemands
Apprentissage	Manuscrit Clavier (Inter)	Manuscrit Clavier Trace (copie sur un modèle) (Intra)	Manuscrit papier (MANp) Manuscrit tablette (MANT) Clavier (Inter)
Apprentissage (stimuli)	8 lettres latines majuscules	12 lettres latines majuscules (4/condition) 12 formes simples (4/condition)	16 lettres latines majuscules
Apprentissage (durée)	4x25 minutes/semaine 2 semaines	1 entraînement	4x25 minutes/semaine 7 semaines
Apprentissage (tâche)	Plusieurs applications : copie et lecture des lettres, génération de mots, compléter mots...	- Recopier les stimuli (8xchacun) - Pas de phono	Plusieurs applications : Copie et lecture de lettres, génération de mots, compléter mots...
Tests	- Ecriture libre de lettres (à la main) - Reconnaissance de lettres (4FC) - Dénomination de lettres - Dictée de lettres - Lecture de 3 mots - Dictée de 4 mots - Compétence visuo-spatiale	Comportement : - Identification de lettres - Conscience phonologique - Discrimination visuelle de mots - Compétence visuo-motrice IRM : Vision passive + 4 lettres et 4 formes non-apprises	- Reconnaissance de lettres (4FC) - Dénomination de lettres - Dictée de lettres - Lectures de 5 mots - Dictée de 5 mots - Compétence visuo-spatiale
Test (moment)	- Pré test - Post test immédiat	Comportement : - Post test immédiat IRM : - Post test immédiat	- Pré test (T0) - Post test immédiat (T1) - Post test 4-5 semaines (T2)
Résultats comportement	Reconnaissance, dénomination des lettres et lecture de mots : Pas de différence Ecriture libre de lettres et dictée : MAN>CLA	-	Reconnaissance visuelle : MANp > CLA Lecture et dictée mots : CLA > MANT à T1 Visuo-spatial : MANp > CLA à T1
Résultats IRM	-	Augmentation connectivité entre FuG gauche et cortex moteur/sensorimoteur primaire pour MAN mais pas pour CLA.	-

	Seyll, Wyckmans et Content, 2020			
Participants	54 adultes belges	57 adultes belges	30 adultes belges	30 adultes belges
Apprentissage	Manuscrit (stylet) Clavier Composition (COMPO) (Inter)	Manuscrit (stylet) Clavier Composition (COMPO) (Inter)	Manuscrit (doigt) Clavier Composition (COMPO) (Intra)	Manuscrit (doigt) Clavier Composition (COMPO) (Intra)
Apprentissage (stimuli)	12 pseudo-lettres	12 pseudo-lettre	24 pseudo-lettres (8/condition)	24 pseudo-lettres (8/condition)
Apprentissage (durée)	1 entraînement/jour 2 jours	1 entraînement	1 entraînement	1 entraînement
Apprentissage (tâche)	- Recopier/ composer les stimuli (12xchacun) - Pas de phono - Durée libre des essais	- Recopier/ composer les stimuli (8xchacun) - Pas de phono - Durée fixe des essais	- Recopier/ composer les stimuli - Pas de phono - Durée libre des essais mais temps de session similaire pour les 3 conditions	- Recopier/ composer les stimuli - Pas de phono - Durée libre des essais mais nombre d'essais similaire pour les 3 conditions
Tests	- Reconnaissance visuelle : 4FC + jugement miroir/normal	- Reconnaissance visuelle : 4FC + jugement miroir/normal	- Reconnaissance visuelle : 4FC + jugement miroir/normal	- Reconnaissance visuelle : 4FC + jugement miroir/normal
Test (moment)	- Post test immédiat - Post test 3 semaines	- Post test immédiat - Post test 2 semaines	- Post test immédiat - Post test 2 semaines	- Post test immédiat - Post test 2 semaines
Résultats comportement	4FC : MAN > CLA et MAN = COMPO Jugement miroir : MAN > CLA et MAN = COMPO Pas d'interaction moment x groupe	4FC : MAN > CLA et MAN = COMPO Jugement miroir : MAN > CLA et MAN = COMPO Pas d'interaction moment x groupe	4FC : pas de différence Jugement miroir : MAN > CLA et MAN = COMPO Pas d'interaction moment x groupe	4FC : MAN > CLA et MAN = COMPO Jugement miroir : MAN > CLA et MAN = COMPO Pas d'interaction moment x groupe
Résultats IRM	-	-	-	-

	Wiley, Wilson, Rapp, 2021
Participants	36 adultes Américains
Apprentissage	Manuscrit Clavier Vision (Inter)
Apprentissage (stimuli)	20 lettres arabes (34 allographes)
Apprentissage (durée)	2 entraînements/semaine 3 semaines max
Apprentissage (tâche)	- Recopier les lettres seules (12x session) - Recopier des mots (chaque lettre 20x session) - Groupe visuel : tâche pareil/différent + nom de la lettre et phono des mots
Tests	- Reconnaissance visuelle depuis le nom (4FC) - Dénomination de lettres - Dictée de lettres (MAN) - Dictée de 20 mots - Lecture de 20 mots Bas niveau visuel : pareil/différent
Test (moment)	- Après chaque séance (4FC) - Post test immédiat
Résultats comportement	MAN apprentissage plus rapide que CLA MAN>CLA dénomination lettre et en dictée Pas de différence en écriture de lettres et en lecture
Résultats IRM	-

Annexe 2 : Exemple du ROC réalisé par un élève

JUGEMENT ORTHOGRAPHIQUE

La personne qui a tapé le texte a commis des erreurs d'orthographe.
Elle a besoin de ton aide car elle n'arrive pas à les trouver.
Peux-tu les souligner et les corriger juste en dessous.

Exemple:

La mézon est jolie

maison

Un jeune garson passionné par la faune, se promené au zoo pour observait
garçon TC promenait TC observer TC
désanimaux sauvages. Le plus imposant d'entre eux, l'éléfant lui parut bien
désanimaux TC imposant TC l'éléphant TC
domestiqué derrière sa grille; les tigres et les lions ressemblai plus à de gros
domestiqués A ressemblaient TC
chats curieu qu'à de terribles prédateur. Toutacoup, l'enfant resta ébahi devant
curieux TC prédateurs TC Tout d'un coup T
le dernier animal non domestiqué du parc. S'était un magnifique oifon perché
A domestiqué TC c'était TC oiseau TC
avec orgueil sur un cayou. Lorsqu'il voulut le photographier, effrayé, l'oiseau
caillou T
sens vola retrouver sa liberté.
devait T

Score 1 (nombre d'erreurs trouvées) : 13/14

Score 2 (nombre d'erreurs correctement corrigées) : 10/14

Score 3 (nombre d'erreurs ajoutées) : 2

J score de jugement orthographique : Score 1 + Score 2 - Score 3 : 21/28

ROC janvier 2008

Cogni-Sciences — UPMF Grenoble, CHU Montpellier, Académie de Grenoble, Académie de Montpellier, Académie de Rennes



22

DICTÉE

Je vais vous raconter l'histoire d'un
 gentil petit garçon qui s'appelle Jo. Jo
 habite chez son oncle, un vieux monsieur
 qui vit dans un bourg. Cet enfant possède
 un don extraordinaire. En effet, grâce
 à ses yeux verts, il voit beaucoup plus loin
 et précisément que tout le monde ! Dans
 cet pupil, se trouvent des jumelles intégrées,
 microscopique et invisible...

U : score d'usage : 7
 $S_{ROC} = J/3 + U + A = 21$

A : score d'accord : 7 +16

ROC janvier 2006

Cogni-Sciences - UPMF Grenoble, CHU Montpellier, Académie de Grenoble, Académie de Montpellier, Académie de Rennes

23



Annexe 3 : Exemple du BHK réalisé par un élève

il fait très beau
je suis bien
je vois de l'eau
mais je ne sais pas

ce qu'elle va

L'eau venait sur le côté, avec une grande
force. Des enfants étaient près de moi.

Le plus petit, demandait ses affaires à une femme
cette femme, qui était grande et belle, devait être un ami. Elle
lui avait pris la main, et je les voyais aller vers.

Annexe 4 : Exemple du questionnaire rempli par un élève

QUESTIONNAIRE

Consigne : Tu dois répondre aux questions en écrivant sur les pointillés ou en entourant la réponse qui te correspond. Ce questionnaire n'est pas noté, il sert à mieux connaître les élèves qui participent à ce cours.

1. Informations générales :

Nom : Prénom :

Classe : 6⁰B Date de naissance : 18/05/2008

Est-ce que tu es : UNE FILLE / UN GARCON

As-tu déjà été suivi pour une difficulté d'apprentissage ? OUI / NON

Si OUI, par qui et pourquoi ?

2. La langue arabe :

Comprends-tu si on te parle en arabe ? Pas du tout / Un peu / Bien / Très bien

Parles-tu arabe ? Pas du tout / Un peu / Bien / Très bien

Si tu parles arabe, de quel dialecte s'agit-il ? (algérien, marocain, tunisien, autre)

Peux-tu lire l'arabe ? Pas du tout / Un peu / Bien / Très bien

Peux-tu écrire l'arabe ? Pas du tout / Un peu / Bien / Très bien

Fais-tu ces activités :

- regarder la télé en arabe ? Jamais / Rarement / Souvent / Tous les jours

- lire des livres en arabe ? Jamais / Rarement / Souvent / Tous les jours

- écouter des chansons ou la radio en arabe ? Jamais / Rarement / Souvent / Tous les jours

- chatter (Messenger, Whatsapp,...) en arabe ? Jamais / Rarement / Souvent / Tous les jours

Si tu chattes en arabe, utilises-tu pour chatter des lettres : ARABES / FRANCAISES

Tes parents parlent-ils en arabe entre eux ? Jamais / Rarement / Souvent / Tous les jours

Entends-tu des gens parler en arabe ? Jamais / Rarement / Souvent / Tous les jours

Es-tu déjà allé dans un pays où l'on parle arabe ?

OUI / NON

Si OUI, lequel/ lesquels ?

As-tu eu des cours d'arabe dans ton école primaire ?

OUI / NON

As-tu eu des cours d'arabe en dehors de l'école ?

OUI / NON

Si OUI, où ça ? École coranique - École (primaire) CM2

As-tu des cours d'arabes en dehors du collège cette année ?

OUI / NON

Si OUI, où ça ? École coranique

Parles-tu une autre langue que le français (et l'arabe) ?

OUI / NON

Si OUI, laquelle/ lesquelles ? le Comorien

3. Lecture et écriture en français :

A la maison, tu écris avec un stylo :

Jamais / Rarement / Souvent / Tous les jours

Trouves-tu qu'écrire avec un stylo est :

Très désagréable / Désagréable / Agréable / Très agréable

4. Utilisation d'ordinateurs, téléphone portable et tablette :

Utilises-tu chez toi :

- un ordinateur : Jamais / Rarement / Souvent / Tous les jours

- un téléphone portable : Jamais / Rarement / Souvent / Tous les jours

- une tablette : Jamais / Rarement / Souvent / Tous les jours

As-tu Internet chez toi ?

OUI / NON

Ecris-tu sur un ordinateur, un téléphone portable ou une tablette :

Jamais / Rarement / Souvent / Tous les jours

Trouves-tu qu'écrire avec un clavier est :

Très désagréable / Désagréable / Agréable / Très agréable

Latéralité manuelle

Indique ta main préférée pour réaliser les activités suivantes :

- Si tu utilises **toujours** cette main, mets deux croix « ++ » dans la colonne correspondant.
- Si tu utilises le **plus souvent** cette main, mets une croix « + » dans la colonne correspondant.
- Si tu peux utiliser **les deux mains**, mets une croix dans chaque colonne.

		Gauche	Droite			Gauche	Droite
1	Écriture		X X	6	Couper du pain		X X
2	Dessin		X X	7	Cuillère		X X
3	Lancer une balle	X	X	8	Allumette		X X
4	Ciseaux		X X	9	Ouvrir un pot de confiture (la main qui tient le couvercle)		X X
5	Brosse à dents		X X				

Annexe 5 : Matériel utilisé dans les tâches de copie

Copie-man, T0 :

Mot	Traduction
ليل	nuit
مدرسة	école
جريدة	journal
حفلة	fête
مدينة	ville
شاي	thé
كتاب	livre
فاكهة	fruit
سنة	année
صباح	matin

Copie-man T1 et T2 et copie-cla T1 :

Copie-man			
attaché		isolé	
اسم	prénom	كرة	ballon
كتاب	livre	تمام	parfait
خمسة	cinq	حفلة	fête
مدينة	ville	دجنبر	décembre
فرنسا	France	فاكهة	fruit

Copie-cla			
attaché		isolé	
باص	bus	شاي	thé
شكرا	merci	قهوة	café
كلمة	mot	تسعة	neuf
سبتمبر	septembre	عشرون	vingt
مرحبا	bonjour	لبنان	liban

Annexe 6 : Matériel utilisé dans allo-lettre

P0 :

AR	amorce	FR	nb_car	amorce_nom	code	position
ساد	ا	la cataracte	3	alif	p_facile	2
واط	و	le watt	3	waw	p_facile	1
ادمة	د	le derme	4	dal	p_facile	2
مسام	م	le pore	4	mim	p_facile	4D
زئبق	ق	le mercure	4	qaf	p_facile	4D
نظير	ظ	l'isotope	4	za	p_facile	2
راتنج	ج	la résine	5	jim	p_facile	5D
كربون	ن	le carbone	5	noun	p_facile	5D
مورثة	ر	le gène	5	ra	p_facile	3
ازميل	ز	le burin	5	zay	p_facile	2
شعب	م	les bronches	3	mim	p_difficile	2
نصب	ص	le jalon	3	sad	p_difficile	2
مقعر	ع	concave	4	ayn	p_difficile	3
حفاز	ح	le catalyseur	4	ha	p_difficile	1
مكثف	ك	un condensateur	4	kaf	p_difficile	2
شبكية	ب	la rétine	5	ba	p_difficile	2
شترتان	ش	l'artère	5	chin	p_difficile	1
أنبوب	ن	l'éprouvette	5	noun	p_difficile	2
نترون	ت	le neutron	5	ta	p_difficile	2
قرنية	ي	la cornée	5	ya	p_difficile	4
ثقل	ت	la pesanteur	3	ta	a_simple	attaché ductus ductus attaché attaché
ردم	ك	l'encombrement	3	kaf	a_simple	
كتلة	ض	la masse	4	dad	a_simple	
كبريت	ف	le soufre	5	fa	a_simple	
ترقوة	ل	la clavicule	5	lam	a_simple	
بشرة	د	l'épiderme	4	dal	a_dif	
وماض	ص	stroboscope	4	sad	a_dif	
طحال	ظ	la rate	4	za	a_dif	
مفصلة	ا	la charnière	5	alif	a_dif	
رنانة	ذ	un résonateur	5	dhal	a_dif	

Abréviations : p = présent ; a = absent

P1 et P2 :

mot_AR	amorce	mot_FR	nb_car	amorce_FR	code	Position/ difficultée	source
غمدة	م	un fourreau	3	mim	p	2	kalimat
نصب	ص	le jalon	3	sad	p	2	kalimat
مقعر	ع	concave	4	ayn	p	3	kalimat
حفاز	ح	le catalyseur	4	ha	p	1	kalimat
مكثف	ك	un condensateur	4	kaf	p	2	kalimat
شبيكية	ب	la rétine	5	ba	p	2	kalimat
شريان	ش	l'artère	5	chin	p	1	kalimat
أنبوب	ن	l'éprouvette	5	noun	p	2	kalimat
نوترون	ت	le neutron	5	ta	p	2	kalimat
قرنية	ي	la cornée	5	ya	p	4	kalimat
بشرة	د	l'épiderme	4	dal	a	attaché	kalimat
وماض	ص	stroboscope	4	sad	a	ductus	kalimat
طحال	ظ	la rate	4	za	a	ductus	kalimat
مفصلة	ا	la charnière	5	alif	a	attaché	kalimat
رنانة	ذ	un résonateur	5	dhal	a	attaché	kalimat
شغل	ت	la pesanteur	3	ta	a	simple	kalimat
ردم	ك	l'encombrement	3	kaf	a	simple	kalimat
كتلة	ض	la masse	4	dad	a	simple	kalimat
كبريت	ف	le soufre	5	fa	a	simple	kalimat
ترقوة	ل	la clavicule	5	lam	a	simple	kalimat
وجه	ه	visage	3	ha2	p	3D	KT3
خبز	خ	pain	3	kha	p	1	KT4
ساعة	ع	heure	4	ayn	p	3	KT2
كرسي	ك	chaise	4	kaf	p	1	KT2
أهلا	ل	bienvenue1	4	lam	p	4D	KT1
سؤال	س	question	4	sin	p	1	KT1
سيرة	ب	tableau (ecole)	5	ba	p	2	KT1
مدرسة	م	ecole	5	mim	p	1	KT1
فنجان	ف	tasse	5	fa	p	1	KT1
ليمون	ي	citron	5	ya	p	2	KT1
ليل	ا	nuit	3	alif	a	attaché	KT1
سنة	ذ	annee	3	dhal	a	attaché	KT3

تونس	ش	tunisie	4	chin	a	ductus	KT3
سبعة	د	sept	4	dal	a	attaché	KT2
صباح	خ	matin	4	kha	a	ductus	KT4
أربع	ص	quatre	4	sad	a	simple	KT
رسالة	ك	lettre	5	kaf	a	simple	KT3
عربية	ل	arabe	5	lam	a	simple	KT1
يناير	م	janvier	5	mim	a	simple	KT
ثلاثة	ط	trois	5	ta2	a	simple	KT1

Abréviations : p = présent ; a = absent

Annexe 7 : Matériel utilisé dans miroir-lettre

lettre arabe	lettre miroir	lettre hébreu	Lettre point
ج	ج	ב	ج
ط	ط	ג	ط
ع	ع	ט	ع
م	م	מ	
و	و	נ	و
ل	ل	ל	ل
س	س	פ	
ص	ص	ש	ص
ق	ق	ץ	
ي	ي	ך	
ك		כ	
ب		ד	ب
ر		ר	ر
ف		צ	ف
ن		ם	
د			د
ح			
غ			
ث			
ذ			
ج	ج		
ص	ص		
ط	ط		
ك	ك		
م	م		
و			
ل			
س			
ع			
ف			
ق			
ي			

Annexe 8 : Matériel utilisé dans lecture-mot

niveau	test	mot	traduction	ordre	session
facile	allo	مدرسة	école	1	T1/T2
facile	copie	فرنسا	France	2	T1/T2
facile	allo	تونس	Tunisie	3	T1/T2
facile	copie	كتاب	livre	4	T1/T2
facile	allo	عربية	arabe	5	T1/T2
facile	copie	شكرا	merci	6	T1/T2
facile	copie	مرحبا	bonjour	7	T2
facile	copie	مدينة	ville	8	T2
diff	allo	يناير	janvier	9	T1/T2
diff	allo	سبعة	sept	10	T1/T2
diff	copie	عشرون	vingt	11	T1/T2
diff	copie	سبتمبر	septembre	12	T1/T2
diff	allo	كرسي	chaise	13	T1/T2
diff	allo	ليمون	citron	14	T2
diff	allo	فنجان	tasse	15	T2
diff	copie	فاكهة	fruit	16	T1/T2

Annexe 9 : Résultats de l'étude ARABESC : figures complémentaires

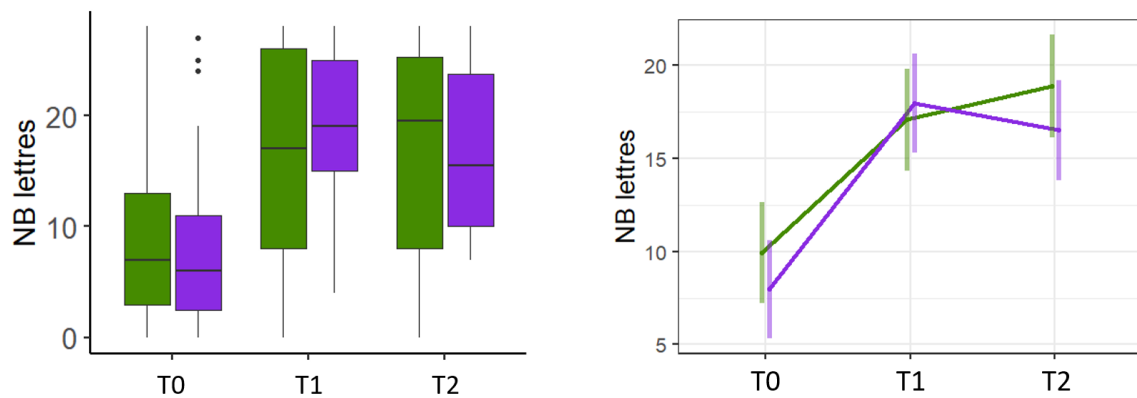


Figure A. Nombre de lettres correctes produites en rappel libre en fonction du groupe et du moment. Gauche : Estimation du modèle de l'interaction entre le groupe et le moment avec intervalles de confiance à 95%. Vert = MAN, violet = CLA.

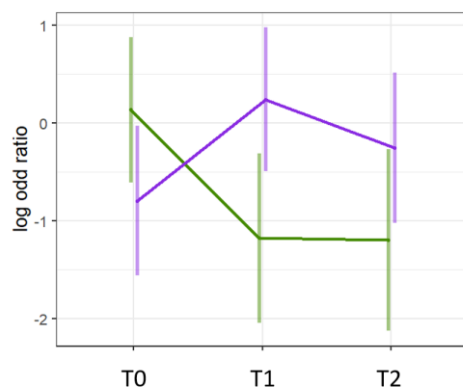


Figure B. Estimation du modèle sur la production d'au moins une lettre en miroir, de l'interaction entre le groupe et le moment, avec intervalles de confiance à 95%. Vert = MAN, violet = CLA.

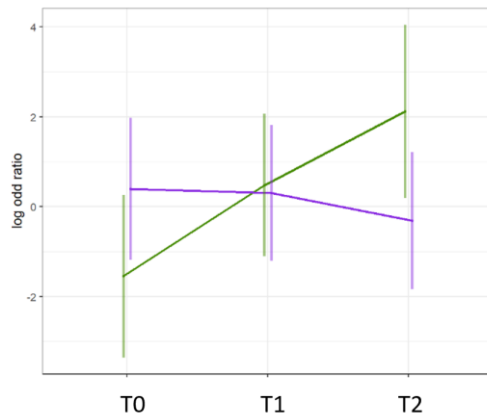


Figure C. Estimation du modèle sur la production des lettres à la suite dans le sens droite-gauche ou gauche-droite, de l'interaction entre le groupe et le moment, avec intervalles de confiance à 95%. Vert = MAN, violet = CLA.

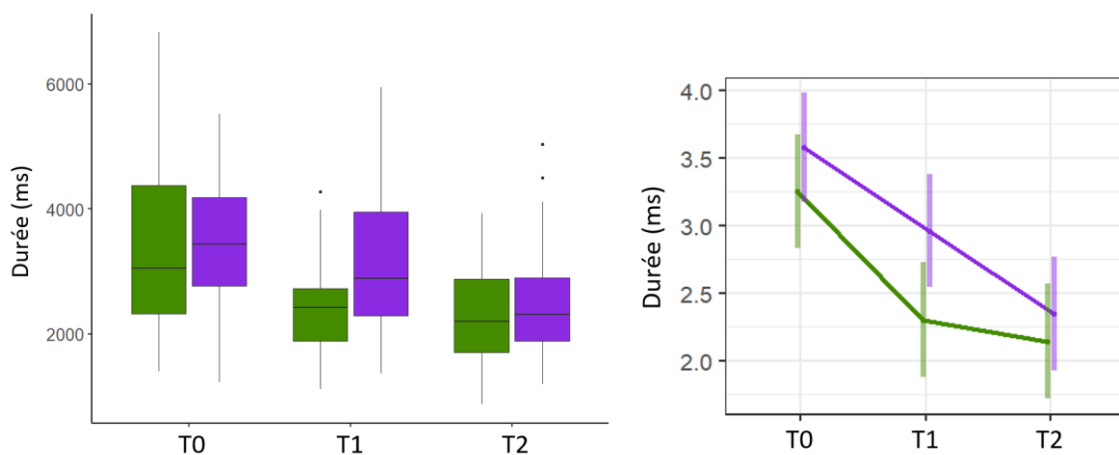


Figure D. Durée d'écriture moyenne d'une lettre en copie facile en fonction du groupe et du moment. Gauche : Estimation du modèle de l'interaction entre le groupe et le moment avec intervalles de confiance à 95%. Vert = MAN, violet = CLA.

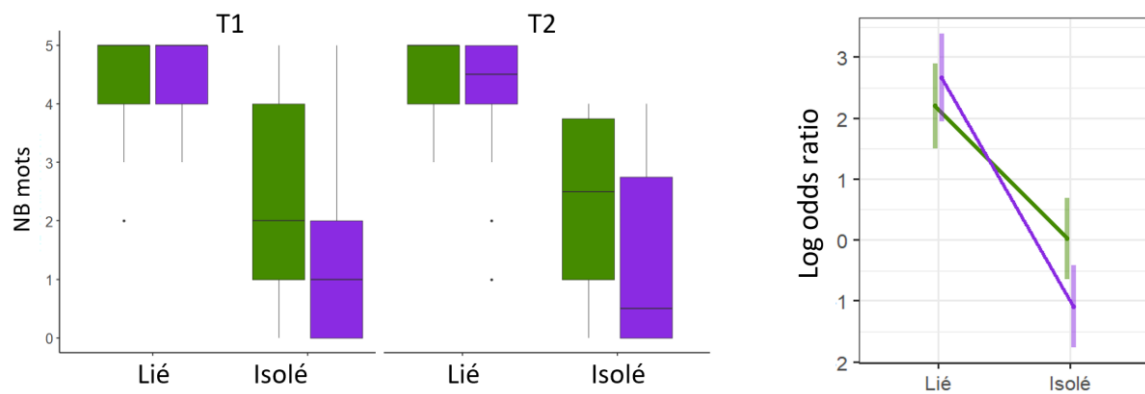


Figure E. Nombre de mots correctement copiés dans copie-man en fonction du groupe, de la difficulté (liée = facile ; isolé = difficile) et du moment. Gauche : Estimation du modèle de l'interaction entre la difficulté et le groupe avec intervalles de confiance à 95%. Vert = MAN, violet = CLA.

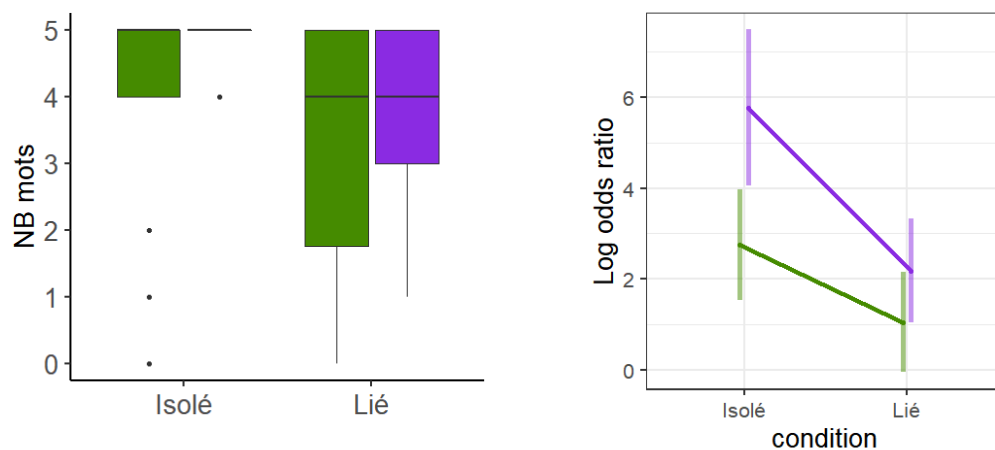


Figure F. Nombre de mots correctement copiés dans copie-cla en fonction du groupe, de la difficulté (liée = facile ; isolé = difficile) et du moment. Gauche : Estimation du modèle de l'interaction entre la difficulté et le groupe avec intervalles de confiance à 95%. Vert = MAN, violet = CLA.

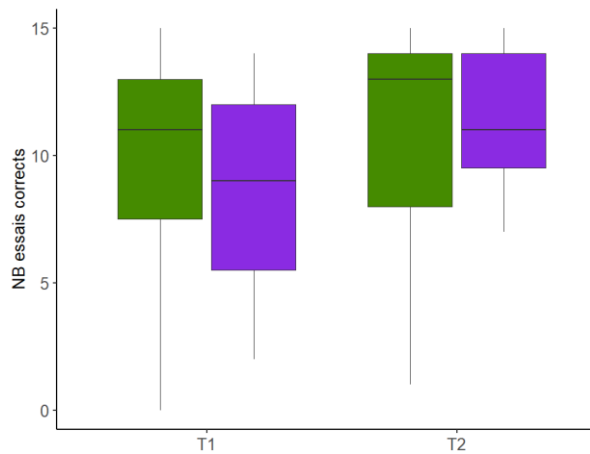


Figure G. Nombre de réponses correctes aux lettres présentées en miroir à la tâche miroir-lettre en fonction du groupe et du moment. Vert = MAN, violet = CLA.

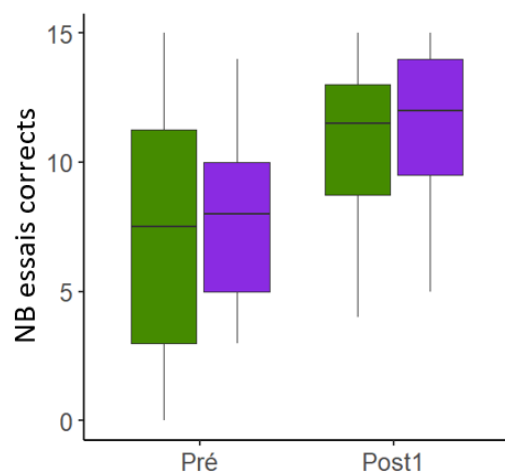


Figure H. Nombre de réponses correctes aux essais difficile de allo-lettre en fonction du groupe et du moment (T0, T1). Vert = MAN, violet = CLA.

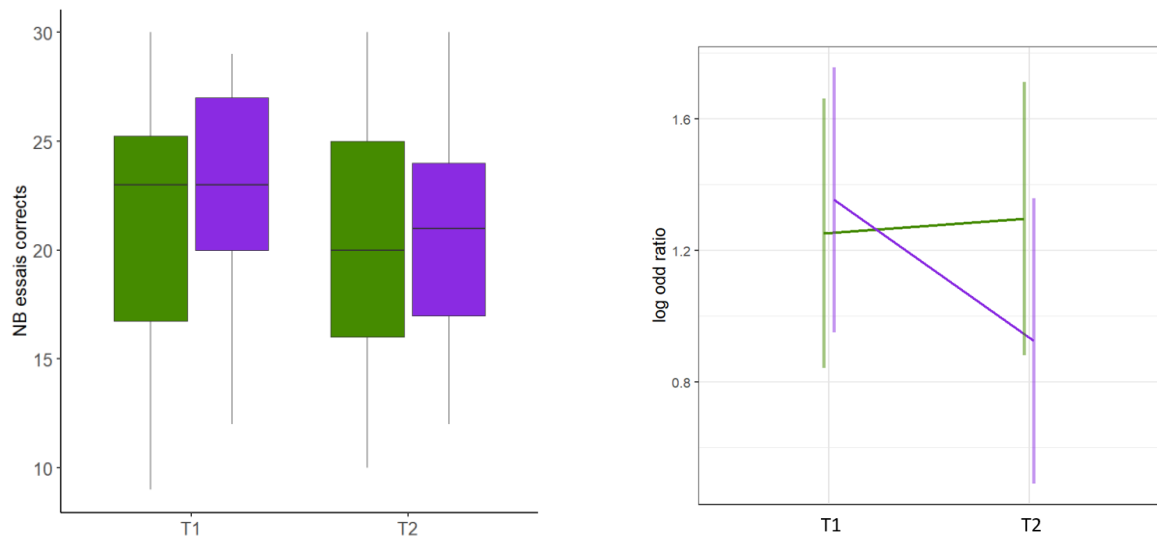


Figure I. Nombre de réponses correctes aux essais difficile de allo-lettre en fonction du groupe, et du moment (T1-T2). Gauche : Estimation du modèle de l'interaction entre le groupe et le moment avec intervalles de confiance à 95%. Vert = MAN, violet = CLA.

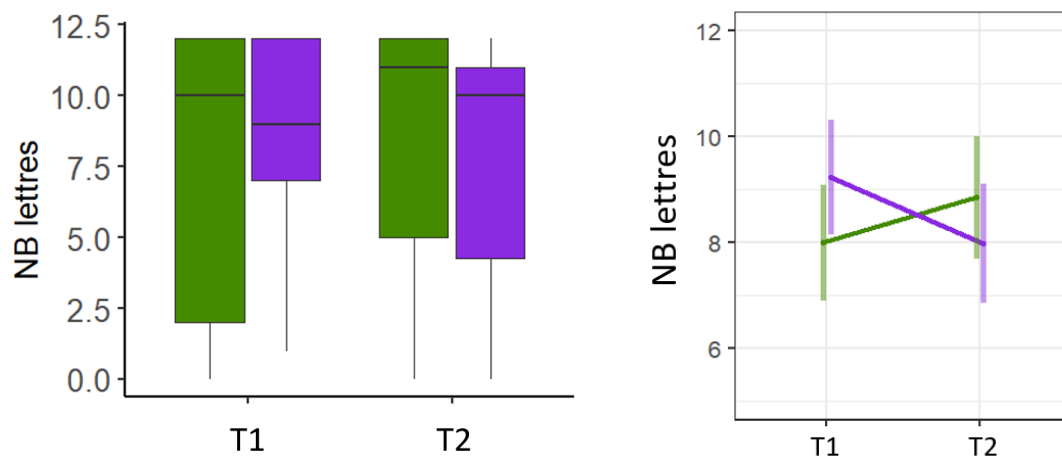


Figure J. Nombre de lettres transcrites phonologiquement à la tâche phono-lettre en fonction du groupe et du moment. Gauche : Estimation du modèle de l'interaction entre le groupe et le moment avec intervalles de confiance à 95%. Vert = MAN, violet = CLA.

Annexe 10 : Principales caractéristiques motrices des lettres utilisées dans l'étude en IRMf définies sur l'études préliminaire comportementale.

Système graphique	complexité	lettres	durée totale (ms)	nb levers	nb traits	nb courbes horaires	nb courbes anti-horai	nb traits G-D	nb traits D-G
Lettres latines	1	c	247 (133)	0,09 (0,3)	1,82 (0,75)	1,45 (0,52)	0 (0)	0,25 (0,5)	0,5 (0,58)
		d	515 (147)	0,27 (0,47)	3,73 (0,65)	2,36 (0,92)	0,09 (0,3)	0,2 (0,42)	0,8 (0,42)
		e	334 (123)	0 (0)	2,18 (0,6)	2 (0,77)	0 (0)	0 (0)	1 (0)
		i	460 (163)	1 (0)	3,36 (1,03)	1,91 (0,94)	0 (0)	0,22 (0,67)	1 (0,71)
		l	337 (101)	0 (0)	2,36 (0,5)	2 (0)	0 (0)	0,51 (0,58)	0,25 (0,5)
		q	500 (273)	0,36 (0,67)	3,36 (2,01)	1,82 (1,17)	0 (0)	0,36 (0,5)	0,64 (0,92)
	2	s	349 (131)	0 (0)	2,45 (0,93)	0,7 (0,48)	1,2 (0,42)	0 (0)	1,33 (0,52)
		v	393 (202)	0 (0)	2,91 (1,22)	1,33 (0,5)	0,44 (0,53)	0,11 (0,33)	1,56 (1,01)
		a	585 (183)	0,36 (0,5)	3,45 (1,13)	2,55 (0,82)	0,09 (0,3)	0,17 (0,41)	1 (0)
		b	571 (170)	0 (0)	3,45 (0,69)	1,73 (1,27)	0,27 (0,47)	0,36 (0,5)	0,82 (0,75)
		f	570 (156)	0 (0)	3,55 (0,52)	2 (0,89)	0,27 (0,47)	0,44 (0,53)	0,78 (0,67)
		g	614 (138)	0,36 (0,5)	4,09 (1,04)	1,82 (0,98)	0,82 (0,4)	0,36 (0,5)	0,45 (0,69)
		j	642 (186)	0,91 (0,3)	3,64 (1,57)	1,2 (0,79)	0,9 (0,57)	0,44 (0,53)	0,78 (0,44)
		m	659 (181)	0,09 (0,3)	4,64 (1,12)	0,45 (0,52)	2,55 (0,52)	0,22 (0,44)	1,22 (0,67)
Lettres arabes	1	p	544 (123)	0,27 (0,47)	3,82 (1,4)	0,8 (0,79)	1,1 (0,99)	0,6 (0,52)	1,3 (0,82)
		t	563 (171)	1 (0)	3,36 (0,81)	1,64 (0,67)	0 (0)	0,6 (0,52)	1,1 (0,57)
		ح	408 (109)	0 (0)	3,09 (1,14)	1,18 (0,6)	0,45 (0,52)	1 (0,53)	0,88 (0,64)
		د	262 (117)	0 (0)	1,91 (0,94)	0 (0)	1,17 (0,41)	0,75 (0,46)	0,88 (0,64)
		ر	156 (88)	0 (0)	1,09 (0,54)	0 (0)	1 (0)	0,86 (0,38)	0,14 (0,38)
		ص	538 (90)	0,09 (0,3)	3,45 (0,82)	0 (0)	2,36 (0,5)	0,56 (0,53)	0,67 (0,71)
	2	ط	526 (152)	0,91 (0,3)	4,09 (0,83)	0,2 (0,42)	1,6 (0,52)	0,55 (0,52)	1 (0,63)
		ل	326 (90)	0 (0)	1,73 (0,79)	0 (0)	1,4 (0,52)	0 (0)	0,5 (0,58)
		ف	487 (183)	0,18 (0,4)	3 (1,34)	0,7 (1,34)	0,9 (0,57)	0,5 (0,71)	0,3 (0,67)
		و	307 (90)	0 (0)	2 (0,63)	0 (0)	1,45 (0,52)	0,67 (0,52)	0,33 (0,52)
		آ	620 (233)	1 (0)	4,18 (1,78)	0,91 (0,3)	0,36 (0,67)	1,09 (0,94)	0,73 (0,79)
		ب	782 (268)	2 (1,05)	4,36 (2,06)	1 (1,5)	1,44 (0,73)	0,7 (0,67)	1,7 (1,25)
		س	584 (172)	0 (0)	3,91 (1,3)	0 (0)	2,09 (1,3)	0,8 (0,42)	0,8 (0,79)
		غ	679 (220)	1,09 (0,3)	4,18 (1,66)	2,64 (1,12)	0,09 (0,3)	0,7 (0,67)	0,6 (0,52)
		ف	617 (207)	1 (0)	3,64 (1,5)	0,27 (0,65)	2,09 (0,94)	1 (0,93)	0,75 (0,46)
		ق	763 (239)	1,45 (0,52)	4,91 (1,92)	0,55 (1,21)	1,82 (1,08)	0,82 (0,75)	1,45 (1,13)
		ك	665 (144)	1 (0)	4,45 (1,21)	0,64 (0,67)	1,73 (0,65)	0,73 (0,65)	1 (1,1)
		ي	731 (293)	1,36 (0,5)	5,18 (1,78)	1,2 (1,03)	1,6 (0,7)	0,45 (0,52)	1,91 (1,45)

Annexe 11 : Caractéristiques visuelles des lettres utilisées dans l'étude en IRMf.

Système graphique	Lettre	vertical	horizontal	slant right	slant left	curve open right	curve closed right	curve open left	curve closed left	curve open top	curve closed top	curve open bottom	curve closed bottom	intersection	terminaison	diacritic	cyclicity	symmetry	closed curve	closed space
Lettres latines	a	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	1	1
	b	0.5	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	2	1	0	0	0	0.5	1
	c	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	2	2	0	0	0	0	0
	d	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	1	1
	e	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0.5	1	1	0	0	0	0.5	1
	f	0.5	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	3	1	0	0	1.5	0
	g	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	2
	h	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0
	i	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0.5	1
	j	0.5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0.5	1
	k	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	4	0	1	0	0
	m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0
	n	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	2	0	0	1	1
	p	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	1	1
	q	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0
	r	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	0	0	0	0
	s	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0
	t	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0
	v	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	2	0	0	0	0
Lettres arabes	ا	1	0.5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	4	0	0	0	0	0
	ب	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	2	3	0	1	0	0
	ج	0	1.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0
	د	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
	هـ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
	و	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	4	0	1	0	0	0
	ز	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
	ح	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0
	ط	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	2	0	0	0.5	1
	ق	0	0.5	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	2	3	1	0	0	0
	ك	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0.5	1
	ل	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	م	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	1
	ن	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1
	ي	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	ة	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	1	0	0	0
	ف	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0.5	1
	ظ	0	0.5	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	2	2	0	0	0	1
	غ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	ي	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	ق	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	ك	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	ل	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	م	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	ن	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	ي	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
ة	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	0	0	0	0	
ف	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ظ	0	1.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	
غ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ي	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ق	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0.5	
ك	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ل	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
م	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ن	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ي	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ة	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ف	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ظ	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
غ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ي	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ق	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ك	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ل	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
م	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ن	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ي	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ة	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ف	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ظ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
غ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ي	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ق	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ك	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ل	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
م	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ن	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ي	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ة	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ف	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ظ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
غ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ي	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ق	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ك	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ل	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
م	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ن	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ي	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ة	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	
ف	0	0	0	0	0															

Annexe 12 : Détail des pré-traitements réalisés pour l'analyse MVPA

Prétraitement de l'image anatomique :

L'image pondérée en T1 (T1w) a été corrigée pour la non-uniformité de l'intensité (INU) avec N4BiasFieldCorrection (Tustison et coll. 2010), distribué avec ANTs 2.2.0 (Avants et coll. 2008, RRID : SCR_004757), et utilisé comme référence tout au long de la procédure. La référence T1w a ensuite été « skull-stripped » avec la procédure antsBrainExtraction.sh (de ANTs), implémentée en Nipype, et en utilisant OASIS30ANTs comme modèle cible. La segmentation du tissu cérébral en liquide céphalo-rachidien (LCR), matière blanche (MM) et matière grise (MG) a été effectuée sur la T1w à l'aide de fast (FSL 5.0.9, RRID : SCR_002823, Zhang, Brady et Smith 2001).

Prétraitement des images fonctionnelles :

Pour chacune des 7 sessions fonctionnelles par sujet, le prétraitement suivant a été effectué. Tout d'abord, un volume de référence et sa version « skull-stripped » ont été générés en utilisant une méthodologie personnalisée de fMRIPrep (Esteban et coll., 2018a ; 2018b). Une carte de non-uniformité B0 (ou carte de champ) a été estimée sur la base de deux (ou plus) références d'imagerie écho-planaire (EPI) avec des directions de codage de phase opposées, avec 3dQwarp Cox et Hyde (1997) (AFNI 20160207). Sur la base de la distorsion de susceptibilité estimée, une référence EPI corrigée a été calculée pour réaliser une coregistration plus précise avec la référence anatomique. La référence BOLD a ensuite été coregistrée avec la référence T1w en utilisant flirt (FSL 5.0.9, Jenkinson et Smith 2001) avec la fonction de registration « boudery-based » (Greve et Fischl 2009). La coregistration a été configurée avec neuf degrés de liberté pour tenir compte des distorsions restantes dans la référence BOLD. Les paramètres de mouvement de la tête par rapport à la référence BOLD (matrices de transformation et six paramètres de rotation et de translation correspondants) ont été estimés avant tout filtrage spatio-temporel à l'aide de mcflirt (FSL 5.0.9, Jenkinson et coll. 2002). Les images BOLD ont été corrigées en fonction du temps de coupe (« slice timing ») en utilisant 3dTshift de AFNI 20160207 (Cox et Hyde 1997, RRID:SCR_005927). Les séries temporelles BOLD (y compris la correction du temps de coupe (« slice-timing » lorsqu'elle est appliquée) ont été rééchantillonnées dans leur espace d'origine en appliquant une seule transformation

composite pour corriger les mouvements de la tête et les possibles distorsions. Ces séries temporelles BOLD rééchantillonnées seront appelées BOLD prétraité. Plusieurs séries temporelles de variables confondues ont été calculées sur la base du BOLD prétraité : le déplacement (FD), le DVARS et trois signaux globaux par région. Le FD et le DVARS sont calculés pour chaque cycle fonctionnel, en utilisant leurs implémentations dans Nipype (selon les définitions de Power et coll. 2014). Les trois signaux globaux sont extraits dans les masques du LCR, de la MW et du cerveau entier. En outre, un ensemble de régresseurs physiologiques a été extrait pour permettre la correction du bruit basée sur les composantes (CompCor, Behzadi et coll. 2007). Les composantes principales sont estimées après un filtrage passe-haut des séries temporelles BOLD prétraitées (à l'aide d'un filtre cosinus discret avec une coupure de 128s) pour les deux variantes de CompCor : temporelle (tCompCor) et anatomique (aCompCor). Les composantes tCompCor sont ensuite calculées à partir des 5 % de voxels variables les plus importants dans un masque couvrant les régions sous-corticales. Ce masque sous-cortical est obtenu en érodant fortement le masque cérébral, ce qui garantit qu'il n'inclut pas de régions de GM corticales. Pour aCompCor, les composantes sont calculées à l'intersection du masque susmentionné et de l'union des masques CSF et WM calculés dans l'espace T1w, après leur projection dans l'espace natif de chaque cycle fonctionnel (en utilisant la transformation inverse BOLD-to-T1w). Les composantes sont également calculées séparément dans les masques WM et CSF. Pour chaque décomposition CompCor, les k composantes ayant les plus grandes valeurs singulières sont retenues, de telle sorte que les séries temporelles des composantes retenues soient suffisantes pour expliquer 50 % de la variance dans le masque de nuisance (CSF, WM, combiné ou temporel). Les composantes restantes ne sont pas prises en compte. Les estimations du mouvement de la tête calculées dans l'étape de correction ont également été placées dans le fichier de variables confondues correspondant. Les séries temporelles de variables confondues dérivées des estimations du mouvement de la tête et des signaux globaux ont été étendues avec l'inclusion des dérivés temporels et des termes quadratiques pour chacun (Satterthwaite et coll. 2013). Tous les rééchantillonnages peuvent être effectués en une seule étape d'interpolation en composant toutes les transformations pertinentes (c'est-à-dire les matrices de transformation tête-mouvement, la correction de la distorsion de susceptibilité lorsqu'elle est disponible, et les co-registres aux espaces anatomiques et de sortie). Les rééchantillonnages grillés (volumétriques) ont été effectués à l'aide de

antsApplyTransforms (ANTs), configurés avec l'interpolation de Lanczos pour minimiser les effets de lissage des autres noyaux (Lanczos 1964). Les rééchantillonnages non maillés (de surface) ont été effectués à l'aide de mri_vol2surf (FreeSurfer).

De nombreuses opérations internes de fMRIPrep utilisent Nilearn 0.6.2 (Abraham et coll. 2014, RRID:SCR_001362), principalement au sein de la procédure de pré-traitement des images fonctionnelles. Pour plus de détails sur le pipeline, voir la section correspondant aux procédures dans la documentation de fMRIPrep.