



HAL
open science

Corrélatés cérébraux de l'écriture manuscrite chez l'adulte et l'enfant

Sarah Palmis, Elie Fabiani, Jérémy Danna, Michel Habib, Jean-Luc Velay,
Marieke Longcamp

► **To cite this version:**

Sarah Palmis, Elie Fabiani, Jérémy Danna, Michel Habib, Jean-Luc Velay, et al.. Corrélatés cérébraux de l'écriture manuscrite chez l'adulte et l'enfant. Approche neuropsychologique des apprentissages chez l'enfant, Pleiomedica, 2021. hal-03284749

HAL Id: hal-03284749

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03284749>

Submitted on 20 Jul 2021

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.

Corrélatés cérébraux de l'écriture manuscrite chez l'adulte et l'enfant

S. PALMIS¹, E. FABIANI², J. DANNA³, M. HABIB⁴, J.-L. VELAY⁵, M. LONGCAMP⁶

RÉSUMÉ : Corrélatés cérébraux de l'écriture manuscrite chez l'adulte et l'enfant

Dans cet article, nous présentons l'organisation des aires cérébrales impliquées dans l'écriture manuscrite chez l'adulte, et nous décrivons des données récentes sur cette organisation dans le cerveau d'enfants en cours d'apprentissage. Chez l'adulte, le réseau impliqué comprend un ensemble de régions pariéto-frontales gauches, le gyrus fusiforme gauche et le cervelet droit. Ces régions codent les aspects orthographiques et moteurs de l'écriture manuscrite. Chez l'enfant de huit à 11 ans, les régions bien décrites chez l'adulte sont également actives : le réseau de l'écriture est déjà structuré. Cependant, des différences observées entre les deux groupes dans le niveau d'activation de certains éléments du réseau, dans le recrutement d'autres régions ou dans la latéralisation des activations témoignent d'un processus en cours d'automatisation.

Mots clés : Écriture – Imagerie cérébrale – Développement – Apprentissage.

SUMMARY: Brain correlates of handwriting in adults and children

In this article, we present the organization of the brain areas involved in handwriting in adults, and we describe recent data on this organization in children. In adults, the network involved includes a set of left parieto-frontal regions, the left fusiform gyrus and the right cerebellum. These regions code the orthographic and motor aspects of handwriting. In children aged 8 to 11 years, the regions previously described in adults are also active: the writing network is already structured. However, differences observed between the two groups in the level of activation of certain elements of the network, in the recruitment of other regions or in the lateralization of activations are the signature of the ongoing automation of writing in children.

Key words: Handwriting – Brain imaging – Development – Learning.

RESUMEN: xxxxx

xxxxx

Palabras clave: xxx.

1. Chercheuse post-doctorante, LNC UMR 7291, Aix-Marseille Université, CNRS.

2. Doctorante, LNC UMR 7291, Aix-Marseille Université, CNRS.

3. Chercheur, LNC UMR 7291, Aix-Marseille Université, CNRS.

4. Neurologue, chercheur associé, LNC UMR 7291, Aix-Marseille Université, CNRS.

5. Chercheur, LNC UMR 7291, Aix-Marseille Université, CNRS.

6. Maîtresse de conférences, LNC UMR 7291, Aix-Marseille Université, CNRS.

Auteur de correspondance :

Marieke Longcamp, Université d'Aix-Marseille, Campus Saint-Charles, 3 Place Victor Hugo, 13331, Marseille, France.

E-mail : marieke.longcamp@univ-amu.fr

.....

Conflicts d'intérêts : les auteurs déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêt.

Introduction

Apprendre à écrire est un processus extrêmement long si l'on considère qu'il commence dès l'âge de deux ans, lorsque les premiers mouvements graphiques sont produits, et qu'il se termine à l'adolescence (Alamargot & Morin, 2019 ; Palmis *et al.*, 2018 ; Zesiger, 1995). Si l'on réfléchit à la précocité de l'apprentissage de l'écriture, au temps passé à écrire tout au long de la vie, et au coût que représente la maîtrise simultanée du geste et du code linguistique, on peut légitimement penser que cet apprentissage doit avoir des conséquences sur l'organisation du cerveau. Un enjeu des recherches actuelles est donc d'évaluer ces conséquences. Nous commençons à avoir des connaissances assez précises sur l'organisation neuroanatomique fonctionnelle de l'écriture dans le cerveau adulte expert (Palmis *et al.*, 2019). Ces connaissances seront présentées dans la première partie de cet article. Plus récemment, notre équipe a également recueilli des données sur cette organisation dans le cerveau d'enfants en cours d'apprentissage. Ces données seront présentées dans la seconde partie.

Neuroanatomie fonctionnelle de l'écriture chez l'adulte

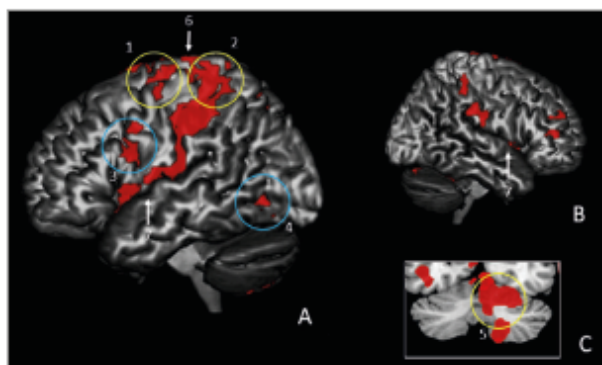
La figure 1 nous montre les activations observées en Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle chez un adulte droitier en train d'écrire des mots dictés, en comparaison avec une situation de repos où le participant tient le stylo sans bouger.

On voit que l'activité cérébrale associée à l'écriture est largement distribuée sur un

ensemble de régions corticales et sous-corticales. Certaines de ces activations sont aspécifiques : elles ne sont pas présentes spécifiquement parce que le participant écrit, mais parce qu'il fait des opérations plus générales : il traite des sons de parole, accède en mémoire à des représentations linguistiques, prépare et exécute une action manuelle séquentielle, etc. C'est le cas par exemple des régions temporales contenant les cortex auditifs primaire et secondaire, du cortex moteur primaire qui contient les neurones pyramidaux qui projettent sur la moelle épinière et transmettent donc directement les commandes motrices vers les muscles contrôlant la main. C'est le cas également de l'aire motrice supplémentaire qui a un rôle reconnu dans la coordination des mouvements complexes, ou des ganglions de la base, organisés en un circuit et permettant notamment la paramétrisation des habiletés motrices séquentielles. Ce sont d'ailleurs des dysfonctionnements dans les circuits des ganglions de la base qui sont à l'origine de troubles moteurs de la maladie de Parkinson, dans laquelle les troubles de l'écriture sont très prégnants et facilement observables lorsque l'écriture devient micrographique chez ces patients (Letanneux *et al.*, 2014).

À l'intérieur de ce large réseau, certaines activations sont considérées comme spécifiques à l'écriture. Elles sont entourées dans la figure 1. Leur spécificité fonctionnelle, c'est-à-dire leur réponse préférentielle pendant l'écriture par rapport à des situations de contrôle, a été évaluée dans un ensemble d'études (pour une revue, voir Planton *et al.*, 2013). Ces études ont comparé l'écriture à des tâches graphomotrices et linguistiques bien appariées sur le plan de leur difficulté (par exemple écriture de mots vs tracé de séries de cercles ou de traits sans signification, écriture de mots vs épellation orale de mots), ou ont manipulé des paramètres plus fins et utilisé des techniques d'analyse permettant d'évaluer quelle information est codée dans les différentes régions (Kadmon Harpaz *et al.*, 2014). L'ensemble des résultats indique que trois régions, le cortex prémoteur dorsal gauche, le cortex pariétal postérieur gauche, et le cervelet antérieur droit (cercles jaunes) seraient spécifiquement impliquées dans les aspects sensorimoteurs de l'écriture manuscrite chez l'adulte droitier. Il y a plusieurs hypothèses sur le rôle fonctionnel précis des éléments de ce réseau : pour certains les régions pariéto-frontales coderaient le rappel et la programmation des trajectoires correspondant aux différentes lettres (Dufor & Rapp, 2013) ; pour d'autres, le cortex prémoteur dorsal, parfois appelé « aire d'Exner », servirait d'interface entre les représentations graphémiques issues des traitements linguis-

Figure 1. Activations cérébrales, enregistrées par IRM fonctionnelle, observées lors de l'écriture de mots sous dictée en comparaison à une situation de repos, chez un individu adulte droitier représentatif. Les activations corticales ont été représentées sur un rendu de surface (A. Vue latérale de l'hémisphère gauche ; B. Vue latérale de l'hémisphère droit). L'activation du cervelet droit a été représentée sur une coupe coronale (C). Les régions spécifiques à l'écriture ont été entourées (en jaune pour les régions impliquées dans les processus sensorimoteurs et en bleu dans les processus orthographiques). [1] Cortex prémoteur dorsal gauche, [2] cortex pariétal postérieur gauche, [3] gyrus fusiforme gauche, [4] gyrus frontal inférieur gauche, [5] cervelet antérieur droit, [6] cortex moteur primaire gauche, [7] cortex auditif gauche et droit. Image issue de données en cours de publication. Palmis *et al.*, 2021, Science.



tiques et les représentations motrices (Roux *et al.*, 2009). Quant au cervelet, les chercheurs du champ du contrôle moteur lui confèrent un rôle central dans l'implémentation des modèles internes qui permettent un mode de contrôle proactif des actions, à la fois en générant la trajectoire désirée et en prédisant les conséquences sensorielles de cette trajectoire (Wolpert *et al.*, 1998).

Par ailleurs, des données indiquent que chez des droitiers, les activations pariéto-frontales spécifiques à l'écriture seraient davantage latéralisées à gauche lorsque l'on écrit, que lorsqu'on réalise d'autres activités grapho-motrices comme le dessin, pour lequel les activations pariéto-frontales sont au contraire très bilatérales (Planton *et al.*, 2017). La raison pour laquelle la latéralisation diffère si fortement entre dessin et écriture n'est pas claire, mais il est possible que l'acquisition d'une expertise pour l'écriture, suite à des années de pratique, induise une latéralisation des populations neuronales impliquées dans le contrôle moteur sélectivement pour cette activité. En outre, pour les droitiers, l'hémisphère gauche est non seulement celui qui contrôle la main dominante, mais aussi le langage (Planton *et al.*, 2017). Il faut noter qu'une latéralisation des activations du gyrus fusiforme est bien documentée dans le domaine de la lecture. Or, le gyrus fusiforme (l'aire visuelle de la forme des mots) est initialement activé bilatéralement au début de l'apprentissage de la lecture, puis des réponses latéralisées à gauche émergent à sept ans et cette latéralisation se renforce jusqu'à 10 ans (Dehaene-Lambertz *et al.*, 2018 ; Schlaggar & McCandliss, 2007 ; Turkeltaub *et al.*, 2008). Un processus comparable pourrait donc se produire au niveau moteur au cours de l'apprentissage de l'écriture.

Enfin, on pense que pendant l'écriture, les processus orthographiques sont principalement sous-tendus par les gyri fusiformes gauche et frontal inférieur gauche (cercles bleus, figure 1). Les données de la neuroimagerie et de patients cérébro-lésés montrent en effet une implication systématique de ces deux régions en relation avec les traitements orthographiques au cours de la production de mots (Planton *et al.*, 2013 ; Purcell *et al.*, 2011 ; Rapp *et al.*, 2016). Ces régions traiteraient donc des informations permettant la récupération des caractéristiques orthographiques et phonographémiques des mots. Le gyrus fusiforme instancierait des représentations des lettres dans un format postulé amodal, utilisé pour les traitements orthographiques (Rothlein & Rapp, 2014). De plus, il a pu être démontré que c'est topographiquement la même région du gyrus fusiforme qui est impliquée lors de tâches de lecture et de production d'orthographe, ce qui pourrait indiquer que les

mêmes représentations orthographiques sont utilisées en lecture et en écriture (Tsapkini & Rapp, 2010).

Quant au cortex prémoteur ventral s'étendant au gyrus frontal inférieur, il s'active de manière comparable pendant l'écriture et la production de parole (Longcamp *et al.*, 2019), ce qui est compatible avec sa position centrale dans la voie dorsale du traitement du langage parlé (Hickok & Poeppel, 2007).

Mise en place du réseau de l'écriture chez l'enfant

Chez l'enfant, les changements les plus importants dans les caractéristiques spatiales et cinématiques de l'écriture surviennent entre cinq et 11 ans. L'évolution de l'écriture entre cinq et huit ans reflète l'évolution des stratégies de contrôle sensoriel du geste par les enfants (Bonneton-Botté, Guilbert & Bara, 2019 ; Palmis *et al.*, 2017). Vers sept-huit ans, malgré plusieurs années de pratique, l'écriture n'est pas encore automatisée. C'est vers neuf-dix ans que les enfants apprennent à maîtriser davantage leur écriture et commencent à la personnaliser.

Cet âge de neuf-dix ans est donc critique parce que c'est le moment où le contrôle sensorimoteur de l'écriture bascule d'un mode fortement contrôlé par le traitement « en ligne » des retours d'informations au cours de l'écriture à un mode plus automatique : les traitements orthographiques peuvent donc commencer à se produire en parallèle du geste. Par conséquent, à partir de neuf ans, on observe que des caractéristiques linguistiques, comme la consistance orthographique d'un mot (ex. solide vs soldat) affectent la production du geste (Kandel *et al.*, 2017 ; Kandel & Perret, 2015). C'est pourquoi notre équipe s'est récemment intéressée aux bases cérébrales de l'écriture entre huit et 11 ans.

Corrélatés cérébraux des compétences en écriture chez l'enfant

Il est complexe de mesurer directement des signaux cérébraux des enfants car la production d'écriture peut générer des mouvements de la tête, et son enregistrement demande des équipements spécifiques. Intéressons-nous d'abord aux études qui obtiennent des informations indirectes en reliant des caractéristiques anatomiques ou fonctionnelles du cerveau dans d'autres tâches à des mesures des compétences d'écriture enregistrées en dehors du scanner (Gimenez *et al.*, 2014 ; Richards *et al.*, 2009), ou à l'expérience antérieure des enfants en matière d'écriture (James *et al.*, 2016 ; James & Engelhardt, 2012 ; James, 2010).

D'abord, au niveau des réseaux moteurs, Richards *et al.* (2009) ont comparé 20 enfants, 12 bons scripteurs et 8 mauvais scripteurs. Les scripteurs catégorisés comme mauvais avaient des scores inférieurs à la moyenne pour leurs âges ou niveaux à différents tests d'écriture standardisés. Richards *et al.* ont montré que les activations de bons et des mauvais scripteurs de 11 ans dans une tâche de séquence motrice des doigts, diffèrent dans une série de régions impliquées dans le contrôle moteur (cortex pré et postcentral, cortex pariétal supérieur, cervelet), mais aussi dans les gyri fusiforme et cingulaire (dont nous verrons ci-dessous le rôle important pour le contrôle cognitif). L'activation de ces régions était par ailleurs corrélée avec le niveau d'automatisation de l'écriture des enfants (mesuré par le nombre de lettres lisibles écrites en 15 secondes durant une tâche de production libre de l'alphabet) et avec leurs compétences en orthographe. La performance en écriture des enfants est donc vraisemblablement influencée par l'efficacité des réseaux cérébraux contrôlant plus généralement la motricité manuelle.

D'autres données indiquent que l'apprentissage de l'écriture conduit également à des modifications fonctionnelles rapides dans le système visuel chez des enfants de maternelle (quatre-cinq ans). C'est ce qu'ont montré Karin James et ses collaborateurs dans une série d'études portant chacune sur une quinzaine d'enfants aux développements typiques. Chez ces enfants, lorsque l'on présente des lettres visuellement, celles apprises en écriture manuscrite génèrent des réponses plus fortes dans le gyrus fusiforme que les lettres apprises par d'autres méthodes (traçage, frappe au clavier, observation visuelle), (James & Engelhardt, 2012 ; James, 2010). Nous l'avons vu plus haut, le gyrus fusiforme a probablement un rôle majeur dans les traitements orthographiques chez l'adulte, via l'instanciation de représentations amodales. En plus de potentialiser la réponse du gyrus fusiforme, l'entraînement par écriture manuscrite favorise l'établissement de connexions fonctionnelles entre les régions fusiforme et précentrales (Vinci-Booher & James, 2016). Dans l'ensemble, ces données montrent que les systèmes cérébraux associés au traitement visuel des lettres peuvent être façonnés par l'expérience de l'écriture chez les jeunes enfants.

Enfin, chez un groupe de 46 enfants de cinq-six ans au développement typique, Gimeñez *et al.* (2014) ont constaté que l'activation dans le gyrus frontal inférieur droit lors d'une tâche phonologique corrélait négativement avec une mesure de la qualité de l'écriture. La quantité de matière grise dans cette même

région corrélait, elle, positivement avec la qualité de l'écriture. Selon les auteurs, ces résultats démontrent l'importance de l'efficacité neuronale pour les traitements phonologiques (qui doivent, lorsqu'ils sont matures, se réaliser davantage dans l'hémisphère gauche) dans le développement de l'écriture manuscrite.

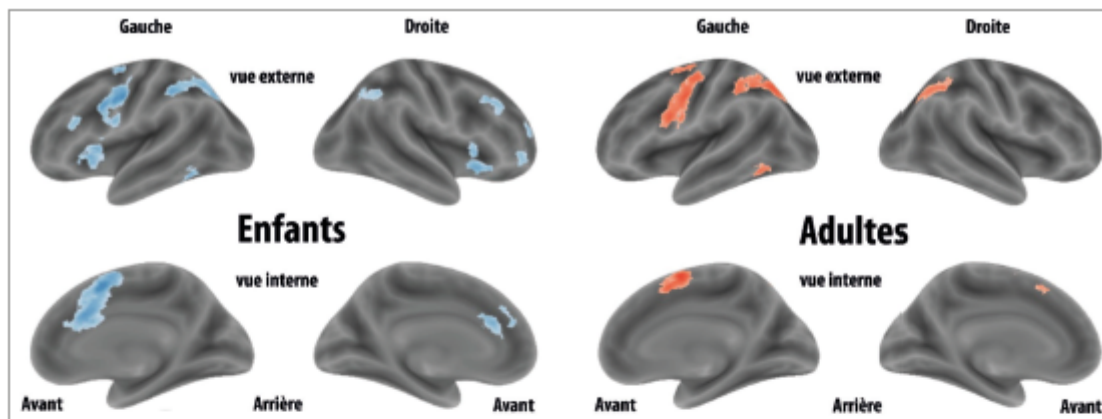
Le réseau de l'écriture chez l'enfant de huit-onze ans

Avant les investigations de notre équipe, une seule étude en IRM fonctionnelle avait mesuré directement les corrélats cérébraux de l'écriture chez les enfants au développement typique (Richards *et al.*, 2011). L'objectif était de comparer les patrons d'activation cérébrale des bons scripteurs et des mauvais scripteurs de 11 ans (les scripteurs étaient catégorisés comme bons ou mauvais en fonction de leurs performances dans un test standardisé d'écriture) pendant la production écrite de caractères nouvellement appris. Les groupes étaient composés de 12 bons et 8 mauvais scripteurs. Les résultats de Richards *et al.* indiquaient que les éléments du réseau d'écriture des adultes sont également activés chez les enfants. En revanche, pour les scripteurs plus faibles, des activations additionnelles dans des régions qui n'appartiennent pas au réseau de l'écriture étaient présentes.

Afin de comparer directement les activations cérébrales pendant l'écriture d'enfants et d'adultes typiques, nous avons mis en place une expérience dans laquelle les participants devaient écrire des séries de lettres, des mots simples en cursive (conditions expérimentales) et tracer des boucles (condition de contrôle) dans le scanner d'IRM fonctionnelle (Palmis *et al.*, 2021). Ces tâches étaient réalisées correctement par les deux groupes, même si les enfants écrivaient plus gros et plus lentement que les adultes. La *figure 2* montre les activations observées pour l'écriture de lettres et de mots par rapport au tracé de boucles chez un groupe de 23 adultes et chez un groupe de 42 enfants de huit à 11 ans. La condition de contrôle permet de soustraire les activations liées à l'exécution et au contrôle aspécifique de gestes manuels. Ces activations reflètent donc l'accès aux représentations des lettres et la programmation des gestes correspondants.

Cette figure indique que la distribution des activations dans le groupe d'adultes et d'enfants est assez similaire : les éléments du réseau décrit dans la première partie sont présents dans les deux groupes (cercles rouges et bleus de la *figure 1*). On voit donc que, conformément aux résultats de (Richards *et al.*, 2011), le réseau est déjà établi chez l'enfant. Mais les foyers d'activation sont éga-

Figure 2. Régions corticales préférentiellement activées pour l'écriture de mots et de lettres par rapport au tracé de boucles, chez des enfants (huit-onze ans) et chez des adultes. Panneau de gauche : Réseau cérébral de l'écriture manuscrite des enfants ; panneau de droite : réseau cérébral de l'écriture manuscrite des adultes. Les activations corticales ont été représentées sur un rendu de surface (vue externe et vue interne de l'hémisphère cérébral). Image traduite de l'article Palmis et al., 2020, Dev. Science.



lement plus nombreux pour les enfants, en particulier dans le cortex préfrontal médial (l'activation de l'aire motrice supplémentaire s'étend dans le cortex cingulaire antérieur) et latéral (gyrus frontal inférieur et insula). Grâce à ses connexions avec le cortex moteur, le cortex cingulaire antérieur joue un rôle important dans le contrôle en ligne de la performance (MacDonald, 2000). Chez les enfants, les patrons de plissement du cortex cingulaire antérieur sont liés à l'efficacité du contrôle cognitif (Cachia et al., 2014). L'insula antérieure est elle aussi impliquée dans le contrôle des performances ainsi que dans l'attention focale (Klein et al., 2013 ; Nelson et al., 2010). Le recrutement de ces régions préfrontales pendant l'écriture chez les enfants est donc compatible avec la moindre automatisé de la tâche dans ce groupe.

Une comparaison directe des deux groupes de sujets nous a ensuite permis de mettre en évidence plusieurs différences importantes.

- Chez les adultes, le cortex moteur primaire droit (donc ipsilatéral à la main qui écrit) et le cervelet antérieur sont plus activés que chez les enfants.

On sait que les changements fonctionnels dans le cortex moteur primaire sont une caractéristique importante de la stabilisation d'une nouvelle habileté motrice en mémoire (Karni et al., 1995 ; Pascual-Leone et al., 1995). L'implication du cortex moteur ipsilatéral au cours de tâches unimanuelles a été interprétée dans d'autres études comme liée au maintien de la balance inter-hémisphérique qui favorise un meilleur contrôle des mouvements, surtout dans des tâches complexes (Bueteufisch et al., 2014 ; Verstynen et al., 2005). L'IRM fonctionnelle ne distingue pas l'excitation de l'inhibition neurale, de sorte que le rôle fonctionnel exact de l'activa-

tion ipsilatérale dans les tâches unimanuelles n'est pas complètement clair. Cependant, il a été démontré par ailleurs, que l'inhibition du cortex moteur ipsilatéral à la main réalisant la tâche améliore la performance (Bueteufisch et al., 2014 ; Kobayashi et al., 2003). Ainsi, l'apprentissage de l'écriture pourrait être associé à une inhibition plus efficace du cortex moteur ipsilatéral.

L'établissement de boucles de contrôle cortico-cérébelleuses est également une étape clé dans les apprentissages moteurs (Doyon et al., 2003). Le rôle particulier de ces boucles dans l'apprentissage de l'écriture avait déjà été envisagé dans un travail de modélisation, dans lequel l'intégration progressive d'un codage prédictif des trajectoires était vu comme le mécanisme central (Grossberg & Paine, 2000). Le recrutement cérébelleux plus important chez des adultes est donc tout à fait cohérent avec l'implication du cervelet dans le contrôle prédictif des actions automatisées (Wolpert et al., 1998).

- L'activation du gyrus fusiforme, commune à l'écriture de lettres et de mots, était plus forte chez les enfants que chez les adultes.

Ce résultat est assez inattendu car au cours du développement de la lecture, c'est plutôt une augmentation de l'engagement fusiforme qu'on observe avec l'apprentissage, chez des enfants de six-sept ans (Dehaene-Lambertz et al., 2018). Il est donc possible que l'évolution de la réponse du gyrus fusiforme gauche au cours du développement, diffère pour la lecture et de l'écriture.

- Enfin, nous avons analysé la latéralisation hémisphérique des activations pour l'écriture de lettres et de mots pour les deux groupes.

Nous avons observé, comme cela était attendu, que les activations étaient latéralisées à gauche

pour les adultes dans les deux conditions. Pour les enfants, la latéralisation à gauche ne concernait que l'écriture de lettres. Pour les mots, l'activation était bilatérale.

Ce profil de latéralisation distinct pour les mots chez les enfants pourrait suggérer que les réseaux cérébraux qui sous-tendent la production de mots ne sont pas encore matures. Ce résultat est conforme à d'autres données, montrant une évolution des modèles de latéralisation avec le développement cognitif (Szaflarski et al., 2006). Il est possible que cela soit dû au fait que les mots ont une composante linguistique plus forte : par exemple Everts et al. (2009) ont montré que l'asymétrie fonctionnelle induite par une tâche de production de mots continue à augmenter entre la fin de l'enfance et l'adolescence.

Conclusion

Le réseau de l'écriture manuscrite d'adultes et d'enfants typiques de huit à onze ans est composé des mêmes régions principales. L'organisation du réseau est donc déjà établie chez les enfants dès huit ans, et elle est très similaire à celle des adultes. Malgré cela, les résultats de notre étude soulignent le rôle majeur du cervelet, du cortex moteur primaire et des régions préfrontales dans l'acquisition des compétences d'écriture. L'implication différentielle de ces régions dans les deux groupes est très probablement liée aux différences en termes d'automatisation de l'écriture. En outre, nos données mettent en évidence un schéma complexe de maturation dans le gyrus fusiforme avec l'acquisition de l'écriture, et un profil de latéralisation spécifique pour la tâche d'écriture des mots chez les enfants. Il sera important à l'avenir de comparer directement les corrélats cérébraux de la lecture et de l'écriture chez des enfants d'âges variés, en particulier pour mieux comprendre l'évolution des propriétés fonctionnelles du gyrus fusiforme au cours de la perception et de la production de l'écrit. Cette première étude, qui concernait des enfants au développement typique, ouvre également des perspectives importantes pour l'étude future des spécificités cérébrales d'enfants présentant des difficultés d'apprentissage orthographique ou moteur lors de tâches d'écriture.

RÉFÉRENCES

- Alamergot, D., & Morin, M.-F. (2019). Approche cognitive de la production écrite : principaux résultats et apports pour l'apprentissage et l'enseignement à l'école. *A.N.A.E.*, *163*(31), 713-721.
- Bonneton-Botté, N., Güllbert, J., & Bars, F. (2019). L'écriture manuscrite : Un apprentissage moteur spécifique. *A.N.A.E.*, *163* (31), 722-729.
- Büetefisch, C. M., Revill, K. P., Shuster, L., Hines, B., & Parsons, M. (2014). Motor demand-dependent activation of ipsilateral motor cortex. *Journal of Neurophysiology*, *112*(4), 999-1009. <https://doi.org/10.1152/jn.00110.2014>
- Cachia, A., Borst, G., Vidal, J., Fischer, C., Pineau, A., Mengin, J.-F., & Houdé, O. (2014). The Shape of the ACC Contributes to Cognitive Control Efficiency in Preschoolers. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *26*(1), 96-106. https://doi.org/10.1162/jocn_e_00459
- 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 Biol*, *16*(3), e2004103. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2004103>
- Deyon, J., Penhune, V., & Ungerleider, L. G. (2003). Distinct contribution of the cortico-striatal and cortico-cerebellar systems to motor skill learning. *Neuropsychologia*, *41*(3), 252-262.
- Dufor, O., & Rapp, B. (2013). Letter representations in writing: An fMRI adaptation approach. *Frontiers in psychology*, *4*, 781.
- Everts, R., Lidzba, K., Wilke, M., Kiefer, C., Mordasini, M., Schroth, G., Perrig, W., & Steinlin, M. (2009). Strengthening of laterality of verbal and visuospatial functions during childhood and adolescence. *Human brain mapping*, *30*(2), 473-483.
- Galea, J. M., Vazquez, A., Pasricha, N., de Xivry, J.-J. O., & Celnik, P. (2011). Dissociating the roles of the cerebellum and motor cortex during adaptive learning: The motor cortex retains what the cerebellum learns. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1997)*, *21*(8), 1761-1770. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhq246>
- Gimenez, P., Bügescu, N., Bleck, J. M., Hancock, R., Pügh, K., Nagamine, M., Kütnier, E., Mezaika, P., Hendren, R., McCandliss, B. D., & Hoeft, F. (2014). Neuroimaging correlates of handwriting quality as children learn to read and write. *Front Hum Neurosci*, *8*, 155. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00155>
- Grossberg, S., & Paine, R. W. (2000). A neural model of cortico-cerebellar interactions during attentive imitation and predictive learning of sequential handwriting movements. *Neural Netw.*, *13*(8), 999-1046.
- Hardwick, R. M., Rottschy, C., Miass, R. C., & Eickhoff, S. B. (2013). A quantitative meta-analysis and review of motor learning in the human brain. *NeuroImage*, *67*, 283-297. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.11.020>
- Hickok, G., & Poeppel, D. (2007). The cortical organization of speech processing. *Nature Reviews Neuroscience*, *8*(5), 393-402.
- 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.
- James, K. H., Jao, R. J., & Berninger, V. (2016). The Development of Multileveled Writing Systems of the Brain. C. MacArthur, S. Graham & J. Fitzgerald. *Handbook of Writing Research*, *2*, 116-129.
- Karin Harman, J. (2010). Sensori-motor experience leads to changes in visual processing in the developing brain. *Developmental science*, *13*(2), 279-288.
- Kedmon Harpe, 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>
- Kendel, S., Lassus-Sangosse, D., Groc-Jacques, G., & Perret, C. (2017). The impact of developmental dyslexia and dysgraphia on movement production during word writing. *Cognitive Neuropsychology*, *34*(3), 219-251. <https://doi.org/10.1080/02643294.2017.1389706>
- Kendel, S., & Perret, C. (2015). How does the interaction between spelling and motor processes build up during writing acquisition? *Cognition*, *136*, 325-336. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2014.11.014>
- Kerni, A., Mejer, G., Jezzard, P., Adams, M. M., Turner, R., & Ungerleider, L. G. (1995). Functional MRI evidence for adult motor cortex plasticity during motor skill learning. *Nature*, *377*(6545), 155-158. <https://doi.org/10.1038/377155a0>
- Klein, T. A., Ullsperger, M., & Danielmeier, C. (2013). Error awareness and the insula: Links to neurological and psychiatric diseases. *Front. Hum. Neurosci.*, *7*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00014>
- Kobayashi, M., Hutchinson, S., Schleug, G., & Pascual-Leone, A. (2003). Ipsilateral motor cortex activation on functional magnetic resonance

- imaging during unilateral hand movements is related to interhemispheric interactions. *NeuroImage*, 20(4), 2259-2270.
- Letanneux, A., Danna, J., Velay, J.-L., Viillet, F., & Pinto, S. (2014). From micrographia to Parkinson's disease dysgraphia: Parkinson's Disease Dysgraphia. *Movement Disorders*, 29(12), 1467-1475. <https://doi.org/10.1002/mds.25990>
- Longcamp, M., Hupé, J.-M., Ruitz, M., Vayssières, N., & Sato, M. (2019). Shared premotor activity in spoken and written communication. *Brain and Language*, 199, 104694.
- MacDonald, A. W. (2000). Dissociating the Role of the Dorsolateral Prefrontal and Anterior Cingulate Cortex in Cognitive Control. *Science*, 288(5472), 1835-1838. <https://doi.org/10.1126/science.288.5472.1835>
- Nelson, S. M., Dosenbach, N. U. F., Cohen, A. L., Wheeler, M. E., Schlagger, B. L., & Petersen, S. E. (2010). Role of the anterior insula in task-level control and focal attention. *Brain Struct Funct*, 214(5), 669-680. <https://doi.org/10.1007/s00429-010-0260-2>
- Palmis, S., Danna, J., Dizierbois, E., & Velay, J.-L. (2018). Bases cérébrales de l'écriture et de son apprentissage. *La lettre des neurosciences*, 55, 25-28.
- Palmis, S., Danna, J., Velay, J.-L., & Longcamp, M. (2017). Motor control of handwriting in the developing brain: A review. *Cognitive Neuropsychology*, 1-18. <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(3), 168-175.
- 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*, 24(2): e13046.
- Pascual-Leone, A., Nguyet, D., Cohen, L. G., Brasil-Neto, J. P., Cammarota, A., & Hallett, M. (1995). Modulation of muscle responses evoked by transcranial magnetic stimulation during the acquisition of new fine motor skills. *Journal of Neurophysiology*, 74(3), 1037.
- 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., Longcamp, M., Péron, 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>
- Purcell, J. J., Türkeltsaub, P. E., Eden, G. F., & Rapp, B. (2011). Examining the central and peripheral processes of written word production through meta-analysis. *Front Psychol*, 2, 239. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00239>
- Rapp, B., Purcell, J., Hillis, A. E., Cessaco, R., & Miceli, G. (2016). Neural bases of orthographic long-term memory and working memory in dysgraphia. *Brain*, 139(Pt 2), 588-604. <https://doi.org/10.1093/brain/awv348>
- Richards, T. L., Berninger, V. W., Stock, P., Altemeier, L., Trivedi, P., & Mars-Villa, K. (2009). Functional magnetic resonance imaging sequential-finger movement activation differentiating good and poor writers. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 31(8), 967-983. <https://doi.org/10.1080/13803390902780201>
- Richards, T. L., Berninger, V. W., Stock, P., Altemeier, L., Trivedi, P., & Mars-Villa, K. R. (2011). Differences between good and poor child writers on fMRI contrasts for writing newly taught and highly practiced letter forms. *Reading and Writing*, 24(5), 493-516. <https://doi.org/10.1007/s11145-009-9217-3>
- 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>
- Roux, F.-E., Dufor, O., Giussani, C., Wemlin, Y., Draper, L., Longcamp, M., & Démonet, J.-F. (2009). The graphemic/motor frontal area Exner's area revisited. *Ann. Neurol.*, 66(4), 537-545. <https://doi.org/10.1002/ana.21804>
- Schlagger, B. L., & McCandliss, B. D. (2007). Development of Neural Systems for Reading. *Annual Review of Neuroscience*, 30(1), 475-503. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.28.061604.135645>
- Szeffelski, J. P., Holland, S. K., Schmithorst, V. J., & Byers, A. W. (2006). fMRI study of language lateralization in children and adults. *Human brain mapping*, 27(3), 202-212.
- Tzupkini, K., & Rapp, B. (2010). The orthography-specific functions of the left fusiform gyrus: Evidence of modality and category specificity. *Cortex*, 46(2), 185-205. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2009.02.025>
- Türkeltsaub, P. E., Flowers, D. L., Lyon, L. G., & Eden, G. F. (2008). Development of Ventral Stream Representations for Single Letters. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1145(1), 13-29. <https://doi.org/10.1196/annals.1416.026>
- Verstynen, T., Diedrichsen, J., Albert, N., Aparicio, P., & Ivry, R. B. (2005). Ipsilateral Motor Cortex Activity During Unimanual Hand Movements: Related to Task Complexity. *Journal of Neurophysiology*, 93(3), 1209-1222. <https://doi.org/10.1152/jn.00720.2004>
- Vinci-Booher, S. A., & James, K. H. (2016). Neural substrates of sensorimotor processes: Letter writing and letter perception. *Journal of Neurophysiology*, 115(1), 1-4.
- Walpert, D. M., Miall, R. C., & Kawato, M. (1998). Internal models in the cerebellum. *Trends in Cognitive Sciences*, 2(9), 338-347. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(98\)01221-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(98)01221-2)
- Zesiger, P. (1995). *Écrire. Approches cognitive, neuropsychologique et développementale* (Vol. 1). PUF.