

Bases cérébrales de l'écriture : orthographe et contrôle moteur de la production

Cerebral bases of writing: spelling and motor control of production

Sarah Palmis, Elie Fabiani,
Marieke Longcamp

Laboratoire de neurosciences cognitives,
UMR 7291, CNRS - Aix-Marseille université,
13331 Marseille, France
<sarah.palmis@univ-amu.fr>

Pour citer cet article : Palmis S, Fabiani E, Longcamp M. Bases cérébrales de l'écriture : orthographe et contrôle moteur de la production. *Rev Neuropsychol* 2019 ; 11 (3) : 168-75 doi:10.1684/nrp.2019.0514

Résumé

Dans cet article de synthèse, nous décrivons le réseau des aires cérébrales impliquées dans la récupération de l'orthographe des mots, et dans les aspects moteurs de l'écriture manuscrite et de la dactylographie. Ce réseau est essentiellement latéralisé dans l'hémisphère gauche et implique des régions (gyrus fusiforme et gyrus frontal inférieur), systématiquement activées pendant la récupération de la représentation orthographique, et déjà identifiées pour leur rôle dans la lecture. Au niveau moteur, les données actuelles disponibles indiquent que par rapport à des tâches de contrôle impliquant des séquences motrices de complexité équivalente, l'écriture manuscrite et l'écriture au clavier recrutent toutes deux spécifiquement le cortex prémoteur dorsal, le cortex pariétal supérieur et le cervelet droit. Après avoir détaillé les propriétés fonctionnelles de chacune de ces régions, nous discuterons des possibles interactions entre la récupération orthographique et le contrôle moteur au cours de l'écriture.

Mots clés : écriture manuscrite • dactylographie • récupération orthographique • imagerie cérébrale

Abstract

In this review article, we describe the network of brain regions involved in spelling, and in the motor aspects of handwriting and typing. This network is mostly lateralised in the left hemisphere. It contains regions such as the fusiform and inferior frontal gyri, which are systematically activated during spelling retrieval. Both regions have already been identified for their pivotal role in reading. At the motor level, the currently available data indicate that compared to control tasks involving motor sequences of equivalent complexity, handwriting and typing both specifically recruit the dorsal premotor cortex, the superior parietal cortex and the right cerebellum. After discussing the functional properties of each of these regions, we consider the possible interactions between spelling and motor control during writing.

Key words: handwriting • typing • spelling • brain imaging

■ Introduction

Quelle que soit la modalité de sortie, écriture manuscrite ou au clavier, l'apprentissage de l'écriture s'étend sur une longue période avant d'atteindre le niveau de l'expertise. Deux types de processus sont mis en œuvre dans la tâche d'écriture. Le premier permet la récupération de la représentation orthographique en mémoire

à long terme et/ou son assemblage via l'application des correspondances phonographémiques propres à la langue en usage [1]. Lorsque les représentations orthographiques sont récupérées, elles doivent être maintenues actives dans une mémoire de travail, encore appelée « buffer graphémique », le temps de tracer les séquences de lettres ou de les sélectionner sur le clavier. L'ensemble de ces processus sont qualifiés de « centraux », et sont supposés être communs à l'écriture manuscrite et à l'écriture au clavier. Le second type de processus correspond au contrôle moteur manuel qui permet de produire les séries de lettres avec un stylo ou de sélectionner successivement

Correspondance :
S. Palmis

les touches du clavier. Ces processus moteurs sont dits « périphériques » [1].

Au niveau périphérique, les approches théoriques et empiriques de l'écriture manuscrite et de l'écriture au clavier sont actuellement très différentes [2, 3]. Certes, il existe des différences très importantes entre ces deux modalités : l'écriture manuscrite est bimanuelle et continue alors que la dactylographie est bimanuelle et discrète. Pour autant, elles reposent probablement sur des processus cognitifs largement communs : l'interface avec l'orthographe [1] ; la mémoire de travail et l'automatisation [2, 3] ainsi que l'apprentissage et le contrôle séquentiels [4].

■ Les régions cérébrales impliquées dans la récupération de la représentation orthographique

Les processus orthographiques sont principalement sous-tendus par les gyri fusiforme (FuG) et frontal inférieur gauches (IFG) [5, 6].

Traditionnellement, le FuG a été étudié pour son implication dans la lecture. Plus connu sous le nom d'aire visuelle de la forme des mots, le FuG montre une activation importante et relativement spécifique aux mots et chaînes de lettres présentés visuellement [7]. Son implication systématique dans les études de neuro-imagerie s'intéressant aux bases neurales de la production orthographique, dans lesquelles il n'y a pas forcément de présentation visuelle de mots, démontre également que le FuG est tout aussi crucial pour les processus centraux de l'écriture [5, 6]. Ces résultats sont en accord avec les études cliniques dans lesquelles des patients présentent des troubles de la récupération orthographique suite à des lésions occipito-temporales [8, 9]. Le rôle spécifique de cette région dans le stockage des représentations orthographiques des mots en mémoire à long terme, ou dans l'accès à ces représentations, est maintenant bien connu [6, 9]. Ce rôle est confirmé par des données montrant que le FuG est plus fortement activé pour des mots peu fréquents que pour des mots fréquents [10]. De plus, topographiquement, la même région du gyrus fusiforme semble être impliquée dans les tâches de lecture et de production orthographique¹, ce qui appuie les hypothèses cognitives qui postulent l'existence d'un lexique orthographique commun aux deux tâches [11].

L'IFG postérieur gauche (pars opercularis) est aussi activé de manière fiable dans des tâches de récupération orthographique [5, 6]. Cependant, le rôle fonctionnel de cette activation est encore débattu. D'un point de vue clinique, il est démontré que des lésions de l'IFG peuvent conduire à une dysgraphie phonologique, c'est-à-dire une difficulté à orthographier des pseudomots en raison d'un déficit des conversions des phonèmes en graphèmes [12]. D'autres données néanmoins montrent que l'IFG joue un rôle similaire à celui du FuG dans le stockage à long terme

¹ Les sujets de l'expérience doivent se prononcer sur la présence d'une lettre dans un mot entendu (ex. la lettre H se trouve-t-elle dans « rythme » ?)

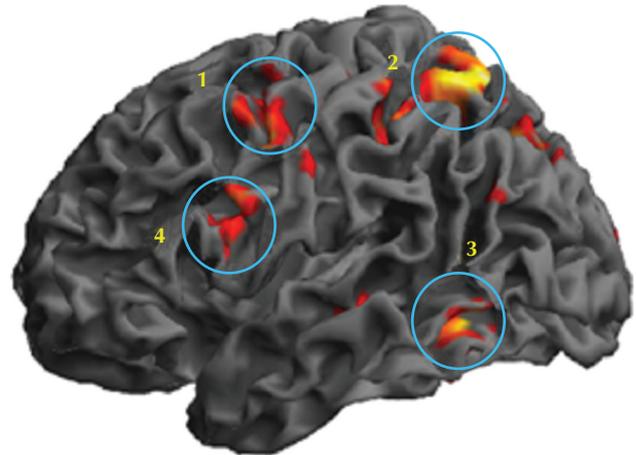


Figure 1. Hémisphère gauche d'un individu représentatif d'un groupe de jeunes adultes pendant l'écriture manuscrite de mots par rapport à une tâche de tracé de boucles. On y retrouve les éléments clés du réseau : cortex pré-moteur dorsal (1) ; cortex pariétal supérieur (2) ; gyrus fusiforme (3) ; gyrus frontal inférieur/cortex pré-moteur 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.

des informations orthographiques (même sensibilité à la fréquence lexicale que celle rapportée plus haut pour le FuG [10]). Une dernière hypothèse est basée sur le rôle plus général de cette région dans le contrôle cognitif, et dans la sélection lexicale en modalité orale. Selon cette hypothèse, l'IFG aurait pour fonction de sélectionner l'information dans les contextes où il existe une compétition entre représentations orthographiques, lexicales, conceptuelles et/ou phonologiques [6].

D'autres régions cérébrales ont encore été identifiées dans la production écrite. Le lobe pariétal inférieur gauche est activé dans des tâches de production écrite et semble être sensible à la longueur des mots et jouer un rôle non négligeable dans la mémoire de travail orthographique [10]. Une étude de la cartographie des lésions établie auprès d'un groupe de patients dysgraphiques montre que la grande majorité de ceux qui présentent des troubles de la mémoire de travail orthographique ont en commun des lésions pariétales inférieures gauches, proches du sillon intrapariétal [9].

Enfin, une dernière région à être systématiquement impliquée dans la production écrite est le cortex pré-moteur ventral (figure 1 ; [5]). Dans une étude récente, Longcamp *et al.* [13] ont mis en place un protocole d'acquisition unique dans lequel chaque sujet réalise quatre tâches distinctes : la lecture, l'écriture de lettres, l'écoute des phonèmes correspondants et leur production orale. Parmi un ensemble d'activations largement spécifiques à chaque modalité, les auteurs ont observé des activations prémotrices ventrales

gauches communes aux quatre tâches [13]. L'activation systématique du cortex prémoteur ventral gauche dans l'écriture pourrait donc s'expliquer par le fait que traiter du langage écrit réactive les représentations articulatoires des phonèmes correspondants. En effet, le cortex prémoteur ventral est l'un des constituants majeurs de la voie dorsale du traitement de la parole [14]. Mais, il est aussi reconnu au cortex prémoteur ventral un rôle plus général qui suggère sa contribution dans des tâches cognitives coûteuses, dès lors que ces tâches impliquent l'accès à des représentations verbales. Ainsi, des données récentes montrent que cette zone cérébrale répond également aux tâches du test de Stroop ou de mémoire de travail auditivo-verbale [15].

■ L'écriture manuscrite

L'apprentissage de l'écriture manuscrite est un processus exigeant qui débute dès l'âge de deux ans, lorsque les premiers mouvements graphiques sont produits, et se termine vers la fin de l'adolescence. L'écriture est guidée par un programme moteur, défini comme un code qui spécifie les traits graphiques qui composent chaque lettre ainsi que leurs relations spatiales, d'une manière indépendante de l'effecteur utilisé, et de la taille des lettres produites [3]. Chez l'adulte expert, les programmes moteurs sont parfaitement appris et maîtrisés : cette automatisation du geste se traduit par un tracé parfaitement fluide. L'automatisation suppose que la tâche peut être réalisée avec une implication attentionnelle minimale et sans interférence avec les autres activités cognitives en cours.

Le réseau cérébral de l'écriture manuscrite experte

Chez un individu donné, l'invariance spatiale de l'écriture d'une production à l'autre, ainsi que l'indépendance de la forme du tracé selon l'effecteur (par exemple, le fait que la forme des lettres reste très similaire que celles-ci soient tracées manuellement avec un stylo ou avec un orteil dans le sable) suggèrent que les patrons moteurs de l'écriture manuscrite sont représentés de manière assez abstraite en mémoire. Des résultats expérimentaux indiquent que l'unité représentée serait la séquence des traits constituant chaque lettre [16]. Des cas de dysgraphies apraxiques pures sont relevés chez des patients qui ont spécifiquement perdu la capacité de former les lettres [17] 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 [16]).

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 [18]. Des dysgraphies apraxiques ont également été rapportées à la suite de lésions cérébelleuses [19], 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 1* représente l'augmentation du signal BOLD projetée sur le cerveau d'un jeune adulte droitier impliqué dans une tâche d'écriture de mots [20]. Le réseau impliqué est composé de plusieurs régions spécifiques, identifiées par ailleurs dans les études de neuropsychologie clinique et de neuro-imagerie [5].

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 [5]. Des lésions très circonscrites de cette région peuvent induire des dysgraphies pures [17]. 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 [21]). Roux *et al.* (2009) [21] 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 [21] ont émis l'hypothèse du rôle d'interface que pourrait jouer cette 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 [22].

Les régions pariétale supérieure gauche et cérébelleuse droite sont également systématiquement impliquées [5]. 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 [23]. Pour Magrassi *et al.* (2010) [23], 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 [4]. 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 [24]. L'implication systématique du

cervelet droit dans l'écriture pourrait donc être liée à un rôle initial dans les premières étapes de l'acquisition [4] 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 du des régions orthographiques décrites plus haut au cours de l'écriture manuscrite de mots [25].

La représentation cérébrale de l'écriture manuscrite chez les gauchers

Certains cas de patients dysgraphiques gauchers suggèrent une latéralisation inversée des engrammes moteurs de l'écriture [26]. Dans une étude en neuro-imagerie, Siebner *et al.* [27] ont comparé, dans une tâche d'écriture manuscrite, trois groupes de sujets : des droitiers, des gauchers contrariés et des gauchers non contrariés. Ils relèvent que les activations pariétales et prémotrices sont bien latéralisées dans l'hémisphère droit chez les sujets gauchers qui utilisent naturellement leur main dominante pour écrire [21]. Par contre, les activations sont plutôt bilatérales dans le groupe des gauchers contrariés [27]. Ces résultats suggèrent que les représentations motrices de l'écriture tendent à se regrouper dans des régions du cerveau initialement consacrées au contrôle des mouvements de la main dominante. Cela confirme que la distribution du réseau moteur de l'écriture est à la fois déterminée par l'organisation initiale du système moteur et par l'entraînement avec un certain effecteur.

L'écriture sur clavier

L'écriture sur clavier a fait l'objet de nombreuses études au cours des années 1980. L'expertise en dactylographie consiste à associer de façon standardisée un doigt et une lettre. Elle se quantifie généralement en fonction de la vitesse de frappe. Les caractéristiques des erreurs produites et les intervalles inter-frappes reflètent la gestion parallèle des différentes frappes par l'expert. Par exemple, les durées des intervalles inter-manuels sont systématiquement plus courtes que celles des intervalles intra-manuels et les durées des intervalles intra-manuels sont essentiellement fonction de la distance entre deux touches [28]. De plus, les erreurs les plus fréquemment commises (omissions, délétions, transpositions ou substitutions) sont liées à la coordination des doigts [28].

Le réseau cérébral impliqué dans la frappe au clavier

Comme nous l'avons mentionné plus haut, les modèles cognitifs de la production écrite postulent que les pro-

cessus centraux de l'écriture sont communs à toutes les tâches d'écriture [1]. En effet, Purcell *et al.*, [29] ont mis en évidence des activations frontales inférieures et fusiformes gauches dans une tâche de frappe de mots. Cependant, sur le plan périphérique, 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 [24], il existe quelques observations de dysgraphie touchant plus sélectivement la frappe au clavier chez des sujets pourtant experts [30, 32]. Ces observations, jusqu'ici plutôt anecdotiques, figurent dans la littérature sous le nom de dystypie (pour l'écriture au clavier) ou dystexie (pour l'écriture sur smartphone). Le patient décrit par Otsuki *et al.* [31] présente un trouble plus marqué pour la dactylographie (lenteur anormale de la frappe, substitution de lettres sur base phonologique), sans aphasie, apraxie ou autre trouble neuropsychologique. La lésion relevée chez ce patient englobe une partie de la région précentrale gauche et implique l'opercule frontal ainsi que le pied de la seconde circonvolution frontale, s'étendant jusqu'à une zone proche de PMD, soit l'aire d'Exner. C'est le cas aussi du patient de Ryu *et al.* [32] dont la lésion principale se situe dans la matière blanche immédiatement adjacente au PMD. Des cas de dystypie sont encore rapportés à la suite de lésions pariétales [23]. Il a aussi été mis en évidence des symptômes de dystypie et dysgraphie au cours de la stimulation électrique d'une région antérieure du lobule pariétal supérieur à la limite du gyrus post-central, chez un patient, opéré d'une tumeur, qui n'avait jusque-là présenté aucun trouble de l'écriture [23]. Par ailleurs, dans les quelques autres études rapportant des cas de dystypie, les localisations des lésions sont variées (par exemple, le cortex temporopariétal pour le patient décrit par Cook *et al.* [30]).

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 troubles rapportés nous amènent à nuancer cette hypothèse.

Concernant les études en imagerie fonctionnelle, à notre connaissance seules trois études ont mesuré l'activité cérébrale au cours de la frappe au clavier [29, 33, 34]. La première [33] est basée sur un protocole expérimental utilisant des séquences de frappes de complexité motrice croissante. Les résultats sont ici à interpréter avec prudence, compte tenu du manque de précision des mesures et des analyses de l'époque. Ils montrent toutefois une activation bilatérale, assez similaire pour les séquences de lettres frappées avec une seule main, et celles frappées avec les deux mains, dans plusieurs régions pariétales, prémotrices et sous-corticales. Les activations relevées dans ces deux conditions de frappe de séquences de lettres sont plus fortes que celles enregistrées pour des séquences unimanuelles dans lesquelles une même lettre est simple-

ment répétée. L'absence de différence significative entre frappes uni- vs bimanuelles est inattendue, mais a néanmoins aussi été observée pour d'autres activités motrices. Les deux autres études ont comparé la frappe de mots à des conditions motrices de contrôle (frappe de séquences de lettres sans signification pré-apprise, ou frappe aléatoire bimanuelle) afin de s'intéresser spécifiquement aux représentations motrices « signifiantes » sur le plan orthographique. Dans les deux cas, les activations enregistrées s'avèrent très comparables à celles observées dans des tâches d'écriture manuscrite, en particulier au niveau du cortex prémoteur dorsal et du cortex pariétal supérieur s'étendant au gyrus postcentral. Higashiyama *et al.* [34] ont comparé la dactylographie à l'écriture manuscrite chez les mêmes sujets et ont observé une activation pariétale localisée au même endroit. Au niveau prémoteur, les activations se superposent en partie tandis que celles observées pour la dactylographie sont plus rostrales que celles relevées pour l'écriture manuscrite. En intégrant des conditions de contrôle appropriées, ces deux études montrent que les activations en dactylographie sont latéralisées, comme l'écriture manuscrite, dans l'hémisphère gauche.

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. 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 et Beeson [18] 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 [6, 10]. 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, Ikkaï *et al.* [35] ont montré

qu'elles se superposent dans plusieurs régions, en particulier dans le sillon intrapariétal et le PMD. Selon Rapcsak et Beeson, ceci expliquerait la proximité des réseaux de l'écriture manuscrite et de la dactylographie [18].

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 [2, 28]. Cela explique que les intervalles inter-frappes peuvent être très courts et que les intervalles entre deux lettres dépendent des lettres qui précèdent et qui suivent (effets contextuels). Pinet *et al.* [36] 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 décours 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 controlatéral 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 [36]. 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.

Notons enfin qu'une seule étude s'est intéressée au changement structuraux potentiels liés à la pratique de la dactylographie [37]. Cannonieri *et al.* décrivent des modifications structurales (épaisseur de la matière grise) qui corréleraient avec la durée (en années) de la pratique de la frappe au clavier dans plusieurs régions corticales et cérébelleuses (notamment le cervelet médian bilatéral et l'aire motrice supplémentaire) impliquées dans la pratique d'habiletés bimanuelles.

■ Les interactions orthographe/geste en écriture manuscrite

Bien que la dissociation entre processus orthographiques et moteurs, et entre leurs substrats neuronaux, soit un fait établi (voir plus haut), la nature de leur relation reste débattue. Selon la position classique de la recherche sur la production du langage, les processus moteurs sont initiés après que les traitements linguistiques soient terminés. Dans le domaine de l'écriture, il est supposé souvent

de manière implicite que l'orthographe doit être récupérée complètement avant que l'information ne soit transmise au niveau moteur, qui fonctionne ainsi de manière indépendante. Les processus orthographiques et moteurs sont ainsi conçus comme discrets et indépendants. Selon une perspective plus récente, le flux des activations entre les niveaux orthographique et moteur est continu, c'est-à-dire que les représentations motrices des lettres sont activées avant que la récupération orthographique ne soit complètement terminée. Les variations possibles de l'activation des informations linguistiques auraient un impact sur les traitements moteurs. Cette position est étayée par une série d'études comportementales qui mettent en évidence l'effet des variables orthographiques sur la production de mouvements requis par l'écriture manuscrite ou la frappe au clavier [38, 39].

Ainsi, des analyses de la cinématique de l'écriture manuscrite sur tablette graphique montrent que les mouvements requis par l'écriture des lettres PAR dans les mots PARFUM et PARDON ne sont pas identiques [38]. Les processus de récupération de l'orthographe sont actifs avant même que ne débute l'écriture et continuent vraisemblablement à être actifs au cours de la production du mouvement. Ainsi, le mouvement produit pour réaliser le tracé de PAR dans PARFUM est plus coûteux que celui produit pour PAR dans PARDON, car PARFUM est un mot orthographiquement irrégulier – c'est-à-dire qu'il n'y a pas de rapport univoque entre les lettres et les sons – alors que PARDON est régulier. Autrement dit, le résultat du tracé est toujours similaire, mais la production des mouvements est régulée par la complexité orthographique et lexicale du mot. Cet effet de régularité est également modulé par la position de l'irrégularité à l'intérieur du mot CHARISME présente une irrégularité en début de mot alors que celle-ci se situe à la fin du mot INSTINCT. Cela suggère que les processus orthographiques sont toujours actifs lorsque les processus moteurs sont engagés, et qu'ils influencent le contrôle fin du geste. Le même type d'effet peut être observé sur les intervalles inter-frappes en écriture au clavier [39]. Notons que d'autres études n'ont pas trouvé de résultats en faveur de traitements continus et interactifs [40] et il n'y a actuellement pas de réel consensus.

Afin de trouver des arguments supplémentaires en faveur ou défaveur de cette hypothèse des traitements continus et interactifs en écriture, nous avons récemment mis en place une étude en neuro-imagerie dans laquelle nous couplons des enregistrements d'IRMf avec des données acquises simultanément sur une tablette graphique IRM-compatible. Cela nous permet de créer des modèles statistiques très précis au plan individuel, qui tiennent compte du déroulement temporel à chaque essai. Nous devrions ainsi être en mesure d'observer un effet de la régularité orthographique dans les régions qui codent la récupération orthographique (FuG et IFG) au début de la réponse écrite. En effet, les mots irréguliers sont à la source d'un conflit entre leur orthographe lexicale et leur transcription phonographémique, ce qui provoque une activation plus importante des régions ortho-

graphiques. Si les processus orthographiques et moteurs fonctionnent de manière sérielle et indépendante, ces effets d'irrégularité devraient disparaître au cours de la réponse écrite, au cours de laquelle seuls les processus moteurs devraient être actifs. Par contre, si les processus orthographiques et moteurs fonctionnent de manière continue et interactive, le signal IRMf mesuré à la fin de la production écrite du mot comportant une irrégularité finale (INSTINCT), devrait se maintenir dans les régions orthographiques. En effet, pour ces mots, le conflit orthographique est toujours présent, alors que pour les mots avec une irrégularité initiale, le conflit n'est plus présent et qu'il n'y a pas de conflit par ailleurs pour les mots réguliers. Si le conflit orthographique influence les traitements moteurs, la cinématique de l'écriture et la réponse des régions motrices devraient aussi être affectées par la présence d'une irrégularité. Les résultats de cette étude [25] montrent que conformément à notre hypothèse, le FuG et l'IFG gauches répondent au cours de la réalisation de l'écriture de manière différenciée selon que les mots dictés (*figure 2*) sont réguliers ou irréguliers. En effet, leur activation se maintient pendant l'écriture des dernières lettres, pour les seuls mots dont l'irrégularité se trouve en position finale (INSTINCT). D'autres régions comme le cortex pariétal inférieur, ou le cortex prémoteur ventral, elles aussi connues pour leur implication dans la récupération orthographique, répondent plus fortement pour les mots irréguliers que pour les mots réguliers pendant la réalisation motrice de l'écriture. La difficulté orthographique semble influencer aussi les traitements moteurs. En effet, la durée d'écriture des lettres correspondant à l'irrégularité dans le mot, CT de INSTINCT ou CH de CHARISME, est allongée, et la réponse du cortex pariétal supérieur gauche et du cervelet droit (deux des régions motrices), est influencée similairement par la régularité orthographique. Pris dans leur ensemble, ces résultats constituent un argument fort en faveur de l'hypothèse d'un fonctionnement parallèle et interactif des traitements orthographiques et moteurs pendant l'écriture.

Si cette conclusion apparaît assez claire pour l'écriture manuscrite, il est possible que ces relations entre traitements orthographiques et moteurs ne soient pas de même nature dans la frappe au clavier. Ainsi, dans une étude utilisant l'électroencéphalographie avec des participants dactylographes experts, Scaltritti *et al.* [40] n'ont pas été en mesure de mettre en évidence une interaction entre les traitements orthographiques et moteurs dans une tâche de dactylographie. Les résultats de leur étude montrent en effet que les potentiels évoqués par les traitements linguistiques et les potentiels enregistrés au-dessus des cortex moteurs juste avant la première frappe évoluent de manière indépendante. Les traitements orthographiques qui se produisent en amont de la frappe d'un mot dactylographié n'affectent donc pas les potentiels de préparation motrice. Ce résultat suggère qu'au moins chez les experts, l'architecture cognitive spécifique à la dactylographie ne permet pas d'interactions entre les niveaux de traitement orthographique et moteur, en raison vraisemblablement des

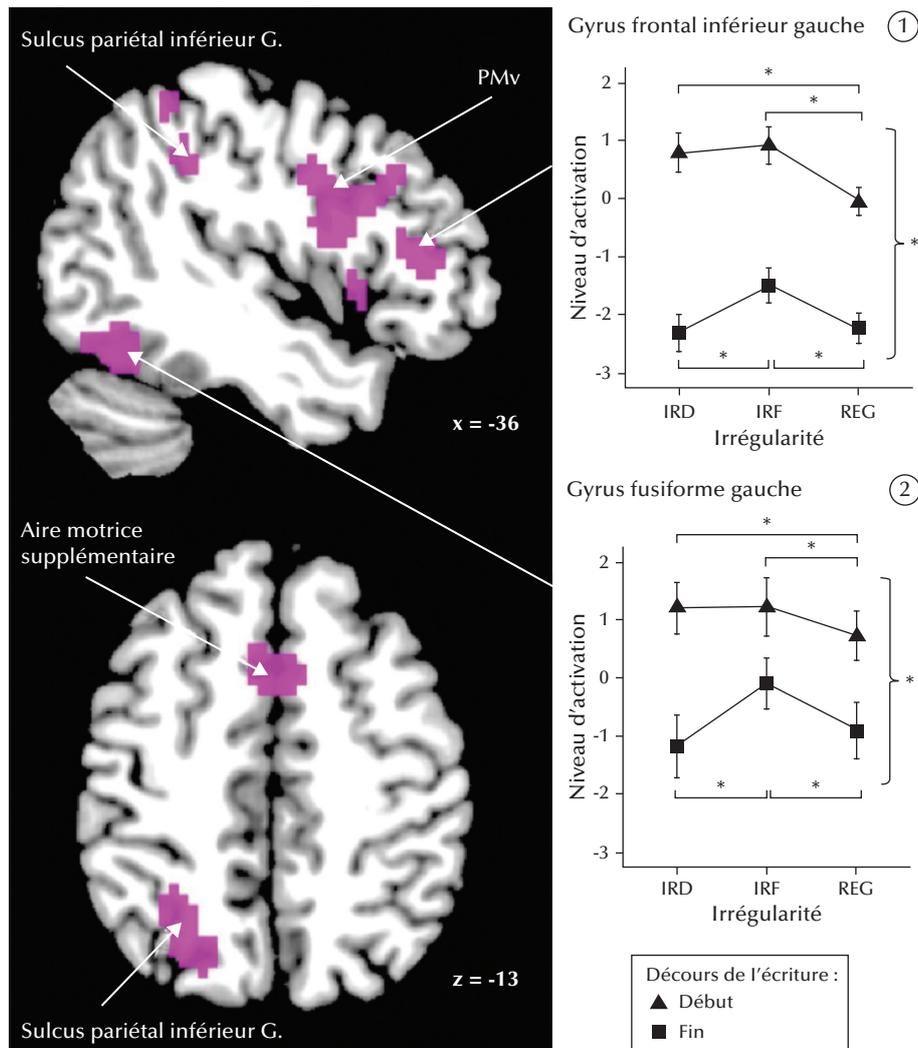


Figure 2. Réseau cérébral dont la réponse varie en fonction de la régularité des mots écrits. Sur le panneau de droite, on voit l'ensemble des régions dont l'activation est plus forte pour les mots irréguliers que pour les mots réguliers au cours de l'écriture manuscrite. On peut identifier les régions connues pour leur implication dans le rappel de l'orthographe. Sur le panneau de droite, le niveau d'activation (valeur moyenne du paramètre statistique pour le groupe de participants à l'étude) est représenté pour les gyri fusiforme (FuG, 1) et frontal inférieur (IFG, 2) gauches, deux régions codant l'orthographe des mots en fonction de la difficulté orthographique du mot écrit et du moment (début ou fin du mouvement d'écriture). L'ensemble du réseau activé est représenté en violet. Les triangles sur les graphiques représentent le niveau du signal en lien avec l'écriture des premières lettres, le signal apparaissant plus fort dans les trois régions quand les mots sont irréguliers (IRB et IRF, mots avec une irrégularité initiale ou finale). Les carrés représentent le niveau du signal en lien avec l'écriture des dernières lettres, et ce signal apparaît plus fort pour les seuls mots dans lesquels l'irrégularité est encore présente (mots IRF).

contraintes d'extrême rapidité imposées par la frappe au clavier, conduisant ces deux niveaux à se structurer en boucles totalement indépendantes [2].

Conclusion

Il reste encore beaucoup à faire pour construire un cadre d'étude commun aux deux modalités de l'écriture : écriture manuscrite et dactylographie. Ce survol de la littérature

en neuro-imagerie nous a toutefois montré que ces deux habiletés pourraient être contrôlées par des réseaux globalement similaires. Il est néanmoins important d'obtenir davantage de données et surtout dans le domaine de la dactylographie. Si cette convergence des deux habiletés au plan cérébral devait se confirmer dans l'avenir, elle devrait offrir des perspectives très intéressantes en termes de compréhension des déficits de production écrite, de réhabilitation et d'apprentissage. Par ailleurs, il est possible qu'en dépit de ce large recouvrement des réseaux neuronaux requis par

l'écriture manuscrite et la dactylographie, les relations entre les processus orthographiques et moteurs (et par conséquent la connectivité entre les éléments de ces réseaux) ne soient pas les mêmes dans les deux tâches. En effet, leurs contraintes de rapidité et de précision (et donc de contrôle de l'erreur sur la base du *feedback* visuel et kinesthésique) sont différentes. Une approche empirique embrassant les

deux modalités de l'écriture est donc indispensable dans l'avenir. ■

Liens d'intérêt

les auteures déclarent ne pas avoir de lien d'intérêt en rapport avec cet article.

Références

- Rapp B, Fischer-Baum S. "Uncovering the cognitive architecture of spelling". In A. Hillis (ed). *Handbook of Adult Language Disorders*. Hove: Psychology Press, 2015. pp. 75-102.
- Logan GD, Crump MJC. Hierarchical Control of Cognitive Processes. *Psychol Learn Motiv* 2011 ; 54 : 1-27.
- Van Galen GP. Handwriting: Issues for a psychomotor theory. *Hum Movement Sci* 1991 ; 10 : 165-91.
- Doyon J, Benali H. Reorganization and plasticity in the adult brain during learning of motor skills. *Curr Opin Neurobiol* 2005 ; 15 : 1611-7.
- Planton S, Jucla M, Roux FE, et al. The « handwriting brain »: a meta-analysis of neuroimaging studies of motor versus orthographic processes. *Cortex* 2013 ; 49 : 2772-87.
- Purcell JJ, Turkeltaub PR, Eden GF, et al. Examining the central and peripheral processes of written word production through meta-analysis. *Front Psychol* 2001 ; 2 : 1-16.
- Cohen L, Jobert A, Le Bihan D, et al. Distinct unimodal and multimodal regions for word processing in the left temporal cortex. *Neuroimage* 2004 ; 23 : 1256-70.
- Tsapkini K, Rapp B. The orthography-specific functions of the left fusiform gyrus: evidence of modality and category specificity. *Cortex* 2010 ; 46 : 185-205.
- Rapp B, Purcell JJ, Hillis AE, et al. Neural bases of orthographic long-term memory and working memory in dysgraphia. *Brain* 2016 ; 139 : 588-604.
- Rapp B, Dufor O. The neurotopography of written word production: an fMRI investigation of the distribution of sensitivity to length and frequency. *J Cogn Neurosci* 2011 ; 23 : 4067-81.
- Rapp B, Lipka K. The literate brain: the relationship between spelling and reading. *J Cogn Neurosci* 2011 ; 23 : 1180-97.
- Henry ML, Beeson PM, Stark AJ, et al. The role of left perisylvian cortical regions in spelling. *Brain Lang* 2007 ; 100 : 44-52.
- Longcamp M, Hupé J, Ruiz M, et al. Shared premotor activity in written and spoken communication. (en revision).
- Hickok G, Poeppel D. The cortical organization of speech processing. *Nat Rev Neurosci* 2007 ; 8 : 393-402.
- Fedorenko E, Behr MK, Kanwisher N. Functional specificity for high-level linguistic processing in the human brain. *P Nat Acad Sci* 2011 ; 108 : 16428-33.
- Palmis S, Danna J, Velay JL, et al. Motor control of handwriting in the developing brain: A review. *Cogn Neuropsychol* 2017 ; 34 : 1-18.
- Anderson SW, Damasio AR, Damasio H. Troubled letters but not numbers. Domain specific cognitive impairments following focal damage in frontal cortex. *Brain* 1990 ; 113 : 749-66.
- Rapcsak SZ, Beeson PM. "Neuroanatomical correlates of spelling and writing". In : Hillis AE. *The handbook of adult language disorders*. Hove : Psychology Press, 2015. pp : 87-116.
- Marien P, Verhoeven J, Brouns R, et al. Apraxic agraphia following a right cerebellar hemorrhage. *Neurology* 2007 ; 69 : 926-9.
- Palmis S, Velay JL, Habib M et al. Development of the handwriting network: a coupled fMRI and kinematics study in middle-age children (en préparation).
- Roux FE, Dufor O, Giussani C, et al. The graphemic/motor frontal area Exner's area revisited. *Ann Neurol* 2009 ; 66 : 537-45.
- Longcamp M, Lagarrigue A, Nazarian B, et al. Functional specificity in the motor system: Evidence from coupled fMRI and kinematic recordings during letter and digit writing. *Hum Brain Mapp* 2014 ; 35 : 6077-87.
- Magrassi L, Bongetta D, Bianchini S, et al. Central and peripheral components of writing critically depend on a defined area of the dominant superior parietal gyrus. *Brain Res* 2010 ; 1346 : 145-54.
- Manto M, Bower JM, Conforto AB, et al. Consensus paper: roles of the cerebellum in motor control—the diversity of ideas on cerebellar involvement in movement. *Cerebellum* 2012 ; 11 : 457-87.
- Palmis S, Velay JL, Fabiani E, et al. The impact of spelling regularity on handwriting production: A coupled fMRI and kinematics study. *Cortex* 2019 ; 113 : 111-27.
- Margolin DI. Right hemisphere dominance for praxis and left hemisphere dominance for speech in a left-hander. *Neuropsychologia* 1980 ; 18 : 715-9.
- Siebner HR, Limmer C, Peinemann A, et al. Long-term consequences of switching handedness: a positron emission tomography study. *J Neurosci* 2002 ; 22 : 2816-25.
- Rumelhart DE, Norman DA. Simulating a Skilled Typist: A Study of Skilled Cognitive-Motor Performance. *Cognitive Sci* 1982 ; 6 : 1-36.
- Purcell JJ, Napoliello EM, Eden GF. A combined fMRI study of typed spelling and reading. *NeuroImage* 2011 ; 55 : 750-62.
- Cook FAB, Makin SDJ, Wardlaw J, et al. Dystypia in acute stroke not attributable to aphasia or neglect. *BMJ Case Rep*. 2013 ; pii: bcr2013200257.
- Otsuki M, Soma Y, Arihiro S, et al. Dystypia: isolated typing impairment without aphasia, apraxia or visuospatial impairment. *Eur Neurol* 2002 ; 47 : 136-40.
- Ryu DW, Kim JS, Yang DW, et al. Dystypia without aphasia associated with visuospatial memory impairment in a patient with acute stroke. *Alzheimer Disease and Associated Disorders* 2012 ; 26 : 285-8.
- Gordon AM, Lee JH, Flament JH, et al. Functional magnetic resonance imaging of motor, sensory, and posterior parietal cortical areas during performance of sequential typing movements. *Exp Brain Res* 1998 ; 121 : 153-66.
- Higashiyama Y, Takeda K, Someya Y, et al. The neural basis of typewriting: a functional MRI study. *PLoS One* 2015 ; 10 : 1-20.
- Ikkai A, Jerde TA, Curtis CE. Perception and Action Selection Dissociate Human Ventral and Dorsal Cortex. *J Cogn Neurosci* 2011 ; 23 : 1494-506.
- Pinet S, Hamamé CM, Longcamp M, et al. Response planning in word typing: Evidence for inhibition. *Psychophysiol* 2015 ; 52 : 524-31.
- Cannonieri GC, Bonilha L, Fernandes PT, et al. Practice and perfect: length of training and structural brain changes in experienced typists. *Neuroreport* 2007 ; 18 : 1063-6.
- Roux S, McKeef TJ, Grosjacques G, et al. The interaction between central and peripheral processes in handwriting production. *Cognition* 2013 ; 127 : 235-41.
- Pinet S, Ziegler JC, Alario FX. Typing is writing: Linguistic properties modulate typing execution. *Psychon B Rev* 2016 ; 23 : 1898-906.
- Scaltritti M, Pinet S, Longcamp M, et al. On the functional relationship between language and motor processing in typewriting: an EEG study. *Lang, Cogn Neurosci* 2017 ; 32 : 1086-101.