



HAL
open science

Comment les nouvelles technologies peuvent aider le scripteur à mieux écrire ? Etude pilote sur la modification de la perception visuelle de la trace.

Jean-François Connan, Marianne Jover, Alexandrine Saint-Cast, Jérémy Danna

► To cite this version:

Jean-François Connan, Marianne Jover, Alexandrine Saint-Cast, Jérémy Danna. Comment les nouvelles technologies peuvent aider le scripteur à mieux écrire ? Etude pilote sur la modification de la perception visuelle de la trace.. A.N.A.E. Approche neuropsychologique des apprentissages chez l'enfant, 2021. hal-03214048

HAL Id: hal-03214048

<https://hal.science/hal-03214048>

Submitted on 30 Apr 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.

Comment les nouvelles technologies peuvent-elles aider le scripteur à mieux écrire ?

Étude pilote sur la modification de la perception visuelle de la trace

J.-F. CONNAN^{1,2,3}, M. JOVER¹, A. SAINT-CAST⁴, J. DANNA²

RÉSUMÉ : Comment les nouvelles technologies peuvent-elles aider le scripteur à mieux écrire ? Étude pilote sur la modification de la perception visuelle de la trace

Les nouvelles technologies ouvrent des opportunités pour aider l'apprentissage et la rééducation de l'écriture, via l'ajout d'informations supplémentaires ou la modification des retours d'informations sensorielles en temps réel. Cet article fait un état des lieux des recherches menées dans ce domaine, et rapporte une expérience pilote visant à démontrer l'intérêt potentiel de la suppression partielle de la trace écrite sur tablette numérique sur l'apprentissage de l'écriture.

Mots clés : Écriture – Numérique – Apprentissage moteur – Feedback sensoriel.

SUMMARY: How can new technologies help the writer write better? A pilot study on changing the visual perception of the trace.

New technologies are opening up new opportunities to assist in the learning and rehabilitation of handwriting, notably by adding supplementary feedback or modifying sensory feedback in real time. This article reviews the current state of research in this field and reports on a pilot study that aimed at highlighting the potential benefits of a partial suppression of the written trace on a digital tablet on learning to write.

Key words: Handwriting – Digital – Motor learning – Sensory feedback.

RESUMEN: ¿Cómo pueden nuevas tecnologías ayudar al escritor a escribir mejor? Un estudio piloto sobre la modificación de la percepción visual del trazo.

Las nuevas tecnologías están abriendo nuevas oportunidades para ayudar el aprendizaje y la rehabilitación de la escritura, en particular añadiendo retroalimentación suplementaria o modificando la retroalimentación sensorial en tiempo real. En el presente artículo se examina el estado actual de las investigaciones en esta esfera y se informa sobre un estudio experimental piloto que tenía por objeto poner de relieve los posibles beneficios de una supresión parcial del trazo escrito por medio de una tableta digital durante el aprendizaje de la escritura.

Palabras clave: Escritura – Digital – Aprendizaje motor – Retroalimentación sensorial.

1. Aix-Marseille Univ, PSYCLE, Aix-en-Provence, France.

2. Aix-Marseille Univ, CNRS, LNC, Marseille, France.

3. ISRP, Marseille, France.

4. ISRP, Paris, France.

Correspondance : Jean-François Connan, Centre PsyCLE, Maison de la Recherche, 29 avenue Schumann, 13621 Aix-en-Provence Cedex, France. E-mail : jfconnan@isrp.fr

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

Introduction

L'apprentissage de l'écriture est un enjeu majeur des classes élémentaires : il constitue un des savoirs fondamentaux de l'école primaire. Cette habileté motrice complexe nécessite une pratique quasi quotidienne durant plusieurs années pour être maîtrisée. Différentes composantes sont impliquées dans l'acte d'écrire, la composante graphomotrice, la composante orthographique et la composante textuelle (Alamargot & Morin, 2019). Ces différentes composantes renvoient à des processus de différents niveaux, chacun pouvant être à la source des difficultés dans l'apprentissage de l'écriture (pour une revue, Palmis *et al.*, 2017). Il est donc important de distinguer les difficultés que l'enfant peut avoir au niveau des processus cognitivo-linguistiques, impliqués par exemple dans la gestion de l'orthographe, de celles qu'il peut avoir au niveau moteur, impliqué dans le contrôle du mouvement du stylo (Huau, Jover & Roussey, 2017 ; Jover *et al.*, 2013). Ici, le propos sera porté principalement sur la composante graphomotrice de l'écriture, c'est-à-dire à son apprentissage moteur et plus particulièrement, aux nouvelles possibilités qu'offrent les nouvelles technologies pour augmenter ou modifier la perception que le scripteur a de son écriture. Il s'agit de techniques de réalité augmentée amenant le scripteur à percevoir des informations supplémentaires ou à changer sa perception naturelle de l'écriture pour l'aider à mieux contrôler la tenue et le déplacement du stylo (pour une revue, voir Danna & Velay, 2015).

Contrôle moteur de l'écriture

Contrôler efficacement le déplacement du stylo pour écrire de manière rapide, fluide et lisible requiert d'avoir mémorisé la manière correcte de tracer les lettres. Cela permet au scripteur de planifier son geste en amont, et de vérifier que ce qu'il écrit est conforme, grâce aux retours d'informations, dits *feedback* sensoriels (FB). Trois types de FB sensoriels sont utilisés de manière complémentaire dans le contrôle de l'écriture : la vision, le tact, et la proprioception. Le scripteur expert utilise les informations visuelles principalement pour contrôler la disposition spatiale du texte dans l'espace graphique, vérifier qu'il écrit droit, l'espacement entre les mots, le lieu de ponctuation. Les informations proprioceptives et tactiles sont quant à elles difficilement dissociables. On se réfère souvent même à l'appellation d'informations « tactilo-kinesthésiques » pour regrouper ces deux informations sensorielles tant leurs contributions sont imbriquées à la fois d'un point de vue neurophysiologique et physique. Les informations « tactilo-kinesthésiques » sont nécessaires à la bonne tenue du stylo par les

doigts et au contrôle de son déplacement sur la feuille. Si ces informations ne sont pas essentielles pour contrôler les composantes spatiales de la trace écrite, elles participent à l'encodage des informations cinématiques et dynamiques du mouvement d'écriture à la base de l'apprentissage moteur.

Apprentissage moteur de l'écriture

Lors de l'apprentissage de l'écriture, les FB sensoriels jouent un rôle fondamental. La nature et l'utilisation des informations qu'ils véhiculent évoluent toutefois en fonction du niveau d'acquisition. Le modèle d'apprentissage moteur de l'écriture qui fait référence dans le domaine est sans aucun doute celui de Grossberg et Paine (2000). Il met l'accent sur le rôle prépondérant de la vision et de l'attention visuelle en début d'apprentissage. Pour tracer une lettre, la vision coderait à partir de la position initiale de la pointe du stylo et de la position cible à atteindre, une représentation de la distance et la direction du vecteur du mouvement à réaliser. Cette représentation vectorielle activerait ensuite les synergies musculaires appropriées pour réaliser ce mouvement de traçage lors de la planification motrice. Les informations motrices relatives à la synergie musculaire seraient également copiées sous forme d'une « copie d'efférence » (Von Holst & Mittelstaedt, 1950) et stockées en mémoire de travail pour permettre de comparer ce qui était planifié avec ce qui est réalisé afin de corriger le codage du mouvement si ces informations ne sont pas identiques. Si la copie d'efférence permet de comparer ce que l'on prédit avec ce qui est fait réellement, elle permet aussi, si le scripteur attribue de la « confiance » (au sens probabiliste et non psychologique) à ce qu'il prédit, de ne pas prendre en compte les retours sensoriels réels afin d'anticiper le codage du mouvement suivant. On appelle automatisation du mouvement le processus qui permet au scripteur d'avoir un contrôle proactif de son écriture, basé principalement sur les informations prédites et non sur des FB en temps réel.

En d'autres termes, en début de pratique, le scripteur utilise le contrôle visuel des informations spatiales car l'écriture doit être lisible. Cependant, ce traitement demande du temps, ce qui explique pourquoi le scripteur débutant est lent. Avec la pratique et l'expertise, le contrôle visuel diminue et le scripteur encode en mémoire à long terme les informations motrices correctement prédites. Le mouvement planifié en amont devient alors plus rapide et plus fluide. L'apprentissage de l'écriture s'explique donc par le passage d'un contrôle centré sur le produit de l'écriture (*i.e.*, sur les informations spatiales relatives à la trace écrite) à un mode de contrôle centré sur le processus

d'écriture (i.e., sur les informations spatio-temporelles relatives au mouvement d'écriture) (Palmis *et al.*, 2017 ; Bonneton-Botté, Guilbert & Bara, 2019). La question que nous posons dans cet article est de savoir comment faciliter, voire accélérer, ce passage sans l'altérer.

Comment les nouvelles technologies peuvent-elles aider à l'apprentissage de l'écriture ?

Les nouvelles technologies, principalement les tablettes graphiques (tablettes à dessin reliées à un ordinateur) et numériques (véritables ordinateurs avec écran tactile et stylet), permettent d'artificiellement modifier la perception de l'écriture en temps réel, par exemple de réduire ou augmenter les FB, ou d'ajouter des FB supplémentaires après l'action. Cette utilisation pourrait faciliter l'apprentissage de l'écriture, ou aider des patients en difficulté pour écrire. Les travaux présentés ci-après s'organisent autour de cette problématique. Nous proposons de décrire trois stratégies de modifications des FB sensoriels et de mettre en perspective les bénéfiques démontrés ou envisagés pour chacune d'elles sur la réalisation du geste d'écriture.

Stratégie 1 : entendre son mouvement pour mieux le percevoir

Une première stratégie est d'augmenter les FB sur le processus d'écriture en utilisant un canal sensoriel disponible. Considérant l'écriture comme une activité silencieuse, l'audition est disponible pour permettre au scripteur de percevoir des informations supplémentaires sans modifier les canaux visuels et proprioceptifs qui sont déjà naturellement utilisés. L'ajout de sons pour informer sur le mouvement en cours est une technique appelée « sonification du mouvement ». Cette technique est déjà bien utilisée dans le domaine du sport (e.g., Effenberg, 2005) ou de la santé (e.g., Scholz *et al.*, 2016). Dans le domaine de l'écriture, les études sont moins nombreuses (pour une revue, Danna & Velay, 2017). Selon la finalité recherchée, différentes variables peuvent être « sonifiées » dans l'écriture : la force musculaire (Baur *et al.*, 2009), la position de la pointe du stylo (Effenberg *et al.*, 2015), ou des variables cinématiques et dynamiques (e.g., vitesse de déplacement, pression du stylo sur la feuille etc., Danna & Velay, 2017).

Stratégie 2 : mieux ressentir son mouvement

En début d'apprentissage, le scripteur contrôle visuellement son écriture pour produire une trace lisible, au prix d'un mouvement lent et saccadé. Les FB proprioceptifs de ce mouve-

ment ne sont alors pas pertinents et détériorent la mémorisation des informations motrices du processus d'écriture (et par conséquent l'automatisation). Permettre au scripteur de ressentir le mouvement correct pourrait théoriquement en faciliter son apprentissage. Deux stratégies sont alors possibles. La première consiste à guider le mouvement du scripteur, à l'instar de l'enseignant qui prend la main de l'élève pour écrire. Cette technique a été testée par Bluteau et collaborateurs (2008), via l'utilisation d'un stylo à retour de force, et semble avoir un effet positif sous condition de faire ressentir la bonne cinématique du mouvement plutôt que la bonne trajectoire spatiale. Ces résultats restent cependant à confirmer et présentent des limites à la fois applicative (l'achat d'un stylo à retour de force et toute l'ingénierie de programmation de ce genre d'outil ne sont pas accessibles à tous) et théorique. En effet, le scripteur guidé n'est pas maître du mouvement effectué : ses contractions musculaires ne correspondent pas au mouvement réalisé. Cela crée un « bruit neuromoteur » lié au conflit entre les FB provenant des fuseaux neuromusculaires des muscles et ceux provenant des articulations (Van Galen *et al.*, 1993). Pour éviter ce problème, la seconde stratégie consiste à proposer au scripteur une exploration haptique via l'utilisation directe du doigt pour tracer les lettres (e.g., Bara *et al.*, 2004). Utiliser le doigt comme stylet permet d'augmenter la prise d'informations « tactilo-kinesthésiques » et amène naturellement le scripteur à focaliser son attention sur le processus d'écriture. Effectuer ce type d'exercice sur des lettres de grand format permet en plus de mieux ressentir les variations de vitesse associées aux variations de courbures de la trace (Viviani & Terzuolo, 1982). Cette méthode semble très prometteuse pour faciliter la mémorisation des informations motrices des lettres, même s'il ne faut pas oublier que tenir un stylo et le déplacer pour écrire n'engendrent pas les mêmes synergies musculaires que celles impliquées dans l'écriture avec le doigt.

Stratégie 3 : diminuer la perception visuelle de l'écriture ?

L'écriture sur tablette numérique ouvre des perspectives de modification de la trace, impossible à effectuer avec le papier. Il est par exemple possible de modifier en temps réel la trace sur l'écran afin d'ajouter d'autres FB visuels. Dans la revue de littérature de Danna et Velay (2015), différentes propositions ont été envisagées, comme, par exemple modifier la couleur de la trace pour informer sur la vitesse d'écriture ou encore son épaisseur en fonction de la pression exercée par le stylet sur la tablette. Ces deux stratégies ont été testées chez l'adulte par Loup-Escande et collabora-

teurs (2017) et semblent très prometteuses. Il faut cependant veiller à ne pas surcharger le traitement des informations visuelles car le système visuel est déjà très sollicité en début d'apprentissage. Pour éviter cela, une autre stratégie serait, au contraire, de faire disparaître totalement ou partiellement la trace écrite pour forcer le scripteur à focaliser sur le mouvement qu'il effectue.

La suppression totale de FB visuel a déjà été testée chez l'adulte et a un effet positif sur la vitesse et la fluidité d'écriture, mais l'effet sur la lisibilité de la trace n'a pas été évalué (Portier & Van Galen, 1992). Pour éviter une perte de précision spatiale, il nous paraît nécessaire de faire apparaître la trace en post-actif (après sa réalisation) pour permettre au scripteur de vérifier visuellement que ce qui vient d'être écrit correspond à ce qui était envisagé, et de limiter cette technique à l'apprentissage de lettres isolées pour éviter d'éventuels problèmes liés à la mémoire de travail (Van Galen et al., 1989). À notre connaissance, l'effet de la suppression partielle de la trace n'a jamais été testée alors que cette méthode pourrait théoriquement être pertinente. Cette idée est inspirée de la technique du *Light Painting* dans laquelle l'utilisateur ne perçoit visuellement que le point lumineux de la pointe d'un stylo (équipé d'une diode électroluminescente). Ce point devient une traînée lumineuse qui suit le stylo lorsqu'il se déplace. La longueur de la traînée lumineuse dépend de la vitesse de déplacement et apporte donc des FB en temps réel à la fois sur la position de la trace écrite et la vitesse du mouvement. Afin de reproduire cette illusion sur tablette numérique, il est possible d'afficher la trace digitale du déplacement du stylet durant une courte fenêtre temporelle. Pour tester cette technique, nous avons mené une étude pilote sur l'apprentissage de nouveaux caractères, avec des adultes. Pour les mettre dans une situation d'apprentissage, comparable à celle d'un enfant qui ne maîtrise pas l'écriture, nous leur avons demandé d'écrire avec leur main non-dominante des caractères inconnus.

Méthode

Participants

Seize adultes entre 18 et 40 ans (âge moyen 27,43 ans, \pm 4,91, 10 femmes, deux gauchers pour l'écriture) ont participé à cette étude, effectuée dans une salle expérimentale de l'université d'Aix-Marseille ou dans un cabinet de psychomotricité, après recueil du consentement éclairé. Ces participants avaient une vision normale ou corrigée. Avant de commencer, ils répondaient à un bref questionnaire sur la présence de difficultés d'apprentissage et à un questionnaire de latéralité manuelle (version

française du test d'Oldfield, 1971). Nous avons également vérifié qu'ils ne connaissaient pas l'alphabet Tamoul.

Tâche

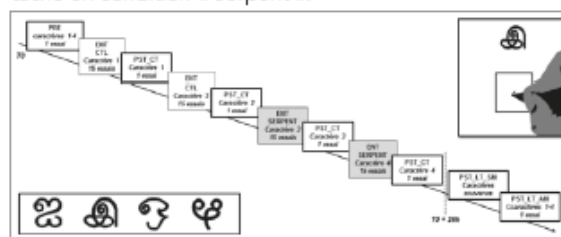
La tâche consistait à apprendre à écrire quatre nouveaux caractères avec un stylet (surface pen, mine HB) tenu par la main non dominante, sur une tablette numérique (Windows surface pro® 12,3 pouces ; fréquence d'échantillonnage à 60 Hz). Le caractère était présenté en haut au milieu de l'écran et devait être reproduit dans un carré (4 x 4 cm) dessiné sous le modèle qui restait affiché durant l'essai (*figure 1, encadré en haut à droite*).

Figure 1. Protocole expérimental dans le temps.

Les phases d'entraînement (ENT) en gris correspondent aux phases où le FB visuel était modifié (Serpent). Les caractères étaient contrebalancés entre les participants, et la moitié des participants ont commencé avec les entraînements en condition « Contrôle » (CTL), l'autre moitié en condition « Serpent » (non illustré ici). PRE : Pré-test ; PST : Post-test ; CT : court-terme ; LT : long terme ; SM : sans modèle ; AM : avec modèle.

Encadré en bas à gauche, présentation des quatre caractères à apprendre. Le point gris indique au participant le point de départ.

Encadré en haut à droite, représentation graphique de la tâche en condition « Serpent ».



Procédure

Modification du FB visuel de la trace

La trace noire du déplacement du stylet était affichée sur fond blanc durant une fenêtre temporelle de 96 ms, puis disparaissait (voir *figure 1 encadré à droite*). Cette condition créait l'illusion d'un serpent qui suit le déplacement de la pointe du stylo, dont la taille variait avec la vitesse de déplacement du stylo et disparaissait lorsque le stylo ne bougeait plus. À la fin de l'essai, le caractère produit par le participant apparaissait dans son intégralité et le modèle restait affiché sur l'écran afin de les comparer visuellement.

Chaque participant apprenait deux caractères en condition « Serpent », les deux autres en condition « Contrôle » sans modification du retour visuel de la trace. L'ordre de présentation des conditions et la répartition des caractères dans chacune des deux conditions étaient contrebalancés entre les participants afin d'éviter les éventuels effets parasites de la difficulté des caractères ou de la tâche d'apprentissage (effet de fatigue, habitude etc.)

Déroulement de l'étude

L'étude débutait par une phase de familiarisation qui consistait à reproduire trois fois un caractère dans la condition « Contrôle » et trois fois dans la condition « Serpent ». Ce caractère était différent des caractères à apprendre. Ensuite, la tâche d'apprentissage était de type pré-test/entraînement/post-test :

- **Pré-test (PRE).** Le sujet devait reproduire une fois les quatre caractères sans modification de la trace écrite.
- **Entraînement (ENT).** L'entraînement était constitué de 15 répétitions du même caractère. Cet entraînement s'effectuait en bloc soit dans la condition « Serpent », soit dans la condition « Contrôle ».
- **Post-test à court terme (PST_CT).** Une minute après chaque session d'entraînement, le participant devait reproduire le caractère entraîné dans la même condition qu'en pré-test, c'est-à-dire sans modification de la trace écrite.
- **Posts-test à long terme (PST_LT).** Le lendemain, deux post-tests étaient effectués. Le premier consistait à écrire les quatre caractères appris la veille, sans présentation du modèle, dans l'ordre souhaité par le participant (PST_LT_SM). Ensuite, le second était effectué avec présence du modèle (PST_LT_AM). Comme dans les autres phases de test, aucune modification de la trace n'était introduite lors de ces PST_LT. L'ordre des quatre caractères à reproduire était identique dans le PRE et le PST_LT_AM (ordre présenté dans la figure 1 en bas à gauche).

Analyse des données

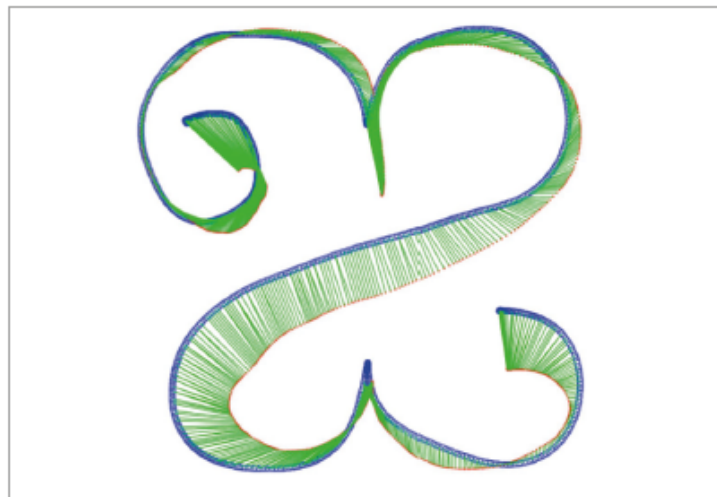
Deux niveaux d'analyse ont été conduits.

1. Analyse qualitative des caractères mémorisés et récupérés en mémoire sans modèle. Nous avons analysé qualitativement les performances des participants dans le PST_LT_SM. Pour cela, nous avons considéré que le caractère était récupéré lorsque le caractère produit correspondait visuellement au modèle appris et respectait le *ductus*. Nous avons ainsi déterminé le pourcentage d'essais réussis pour les caractères appris en condition « Serpent » et en condition « Contrôle » pour chaque sujet, et comparé le pourcentage moyen à un standard fixé à 50 % (correspondant au hasard). Enfin, nous avons déterminé la condition d'apprentissage du premier caractère rappelé et comparé le pourcentage de caractères appris en condition « Serpent », à celui appris en condition « Contrôle », à l'aide d'un test du χ^2 .

2. Analyse quantitative de la performance d'écriture lors des phases d'entraînement et de tests avec modèle. À partir du recueil de la position et de la pression axiale du stylet, nous avons segmenté les caractères pour distinguer les parties tracées des levers. Seules les parties tracées ont été analysées à travers cinq variables, dont trois sur le processus d'écriture et deux sur le produit de l'écriture :

- la vitesse d'écriture (millimètres/seconde),
- la dysfluence du mouvement (nombre de pics de vitesse anormaux, voir Danna, Paz-Villagrán & Velay, 2013 pour le calcul de cette variable nommée SNvpd),
- la pression du stylet (unité arbitraire normalisée entre 0 et 1),
- la longueur de tracé (millimètres),
- l'erreur spatiale entre le caractère produit et le caractère modèle. Nous avons développé un algorithme sur *Matlab*® permettant de calculer la distance moyenne entre le caractère produit par le participant et un caractère de référence (voir figure 2). Ce caractère de référence, utilisé par tous les participants, correspondait au modèle produit par un scripteur expert avec sa main dominante et filtré à l'aide d'un filtre *Butterworth passe-bas d'ordre 4* et avec une fréquence de coupure à 5 Hz. Les deux caractères à comparer ont été normalisés entre « zéro et un sur x et sur y » pour permettre une superposition entre eux. Les coordonnées ont été interpolées à 1 000 points en utilisant un polynôme d'interpolation cubique. Comme illustré sur la figure 2, une itération a été effectuée pour calculer la distance euclidienne la plus petite (en vert) entre les 1 000 points qui forment le caractère produit (en rouge) et les points qui forment le caractère de référence (en bleu). L'erreur spatiale correspond à la distance moyenne entre les deux caractères.

Figure 2. Illustration du calcul de l'erreur spatiale. En rouge, le caractère produit par un participant. En bleu, le caractère de référence qui correspond au caractère à reproduire. En vert, erreur spatiale entre les deux caractères.



Au total, 1 152 données ont été collectées. Un certain nombre d'essais n'ont pas été analysés pour diverses raisons : deux essais ont été supprimés à la suite d'un problème d'enregistrement, six essais ont été supprimés pour non-respect de la forme ou inattention du sujet, et arrêt en cours d'essai. Nous avons également supprimé des essais considérés comme déviants/aberrants en utilisant la méthode de l'intervalle interquartile avec un

« facteur deux » de l'écart interquartile au-dessus du 75^e percentile et en dessous du 25^e percentile. Cette méthode a été appliquée à l'ensemble des variables pour chaque condition afin d'identifier les essais extrêmes aberrants. Cela a abouti à la suppression de 56 essais. La distribution des variables a ensuite été testée et satisfaisait les critères énoncés par Howell (2016) concernant l'asymétrie (Kurtosis entre -1.3 et +1.3) et l'aplatissement (Skewness entre -2 et +2).

Pour ce niveau d'analyse, nous avons effectué deux analyses statistiques distinctes à l'aide du logiciel JAMOVI® (The Jamovi project, 2020 ; R Core Team, 2019) en appliquant un modèle à effets mixtes (LMM, module GAMLJ, Galluci, 2019) :

- une comparaison des performances pendant les phases de test (avec modèle) via des tests Omnibus avec le facteur « Apprentissage » (3 modalités : PRE vs PST_CT vs PST_LT_AM) et le facteur FB (2 modalités : caractères appris pendant les entraînements en condition Serpent vs Contrôle) comme facteurs fixes à mesures répétées, et avec les « participants » et les « caractères » en facteurs aléatoires¹.

- une comparaison des performances pendant les phases d'entraînement via des tests Omnibus avec le facteur « Essai » (15 modalités : de 1 à 15) et le facteur « FB » (deux modalités :

¹ • Notons que pour la variable Pression, le modèle n'a pu être appliqué avec le facteur Caractère en facteur aléatoire car la variabilité était indiquée comme insuffisante. Pour cette variable uniquement, seul le facteur Participant a été considéré comme facteur aléatoire.

condition « Serpent » vs « Contrôle ») comme facteurs fixes à mesures répétées, et avec les « participants » et les « caractères » en facteurs aléatoires.

Tous les seuils de signification ont été fixés à $p = 0.05$. Une analyse des effets simples du facteur « Apprentissage » avec le facteur FB en modérateur a été effectuée lorsque l'analyse Omnibus a révélé un effet significatif des deux facteurs principaux. Sinon lorsque l'effet d'un seul facteur était significatif, des analyses *post hoc* LSD de Fisher avec correction de Bonferroni ont été appliquées pour les comparaisons multiples.

Résultats

Analyse qualitative des caractères mémorisés et récupérés en mémoire

Les caractères récupérés en mémoire et écrits correctement lors du PST_LT_SM, effectué le lendemain de la phase d'entraînement, sont rapportés dans le *tableau 1*.

Seul un participant a retracé les quatre caractères correctement et trois participants n'ont pas réussi à retracer au moins un des caractères appris. Au total, 25 caractères ont été récupérés en mémoire et écrits correctement sur les 64 potentiels (16*4). Sur ces 25 caractères, 14 avaient été appris en condition « Serpent » et 11 en condition « Contrôle ». Le pourcentage de caractères appris dans la condition « Serpent » parmi les caractères tracés cor-

Tableau 1. Répartition des caractères appris dans la condition « Serpent » et des caractères tracés correctement dans le post-test à long terme sans modèle (PST_LT_SM). Les deux colonnes de droite présentent le pourcentage des caractères appris en condition « Serpent » parmi les caractères tracés correctement et la condition d'entraînement du premier caractère rappelé par participant.

Participant	Caractères appris en condition « Serpent »	Caractères rappelés lors du post-test	% de caractères rappelés appris en condition « Serpent »	Condition d'entraînement du premier caractère rappelé
1	A et B	A-D-C-B	50	Serpent
2	A et B	A-C-D	33.3	Serpent
3	A et B	A	100	Serpent
4	A et B	A	100	Serpent
5	A et B	A-C	50	Serpent
6	A et B	C-A	50	Contrôle
7	A et B	A-B	100	Serpent
8	A et B	A	100	Serpent
9	C et D		/	/
10	C et D	C	100	Serpent
11	C et D	A-C	50	Contrôle
12	C et D		/	/
13	C et D	C-A-B	33.3	Serpent
14	C et D		/	/
15	C et D	C	100	Serpent
16	C et D	A-B	0	Contrôle

rectement dans ce post-test ($66,6 \% \pm 34,7$) n'est pas significativement plus élevé que le hasard à 50 % ($t(12) = 1,72, p = 0,11, NS$). Enfin, sur les 13 participants ayant retrouvé au moins un caractère, 10 ont tracé en premier un caractère appris en condition « Serpent » et trois participants ont tracé en premier un caractère appris en condition « Contrôle ». Dit autrement, 76,9 % des caractères remémorés en premier avaient été appris en condition « Serpent », ce qui révèle un effet significatif en faveur de la condition « Serpent » sur la primauté de la récupération en mémoire et des réponses en PST_LT_SM ($\chi^2(1) = 7,54, p < 0,01$).

Analyse quantitative de l'écriture

L'évolution moyenne des caractéristiques de la performance d'écriture (vitesse, dysflue, longueur du tracé et erreur spatiale) pendant les phases de test (PRE, PST_CT et PST_LT_AM) et pendant les entraînements est présentée sur la figure 3.

Vitesse du mouvement

L'évolution moyenne de la vitesse est présentée sur la figure 3A.

- *Comparaison des phases de test.* L'analyse a révélé un effet significatif de l'Apprentissage sur la vitesse ($F(2,153) = 4,32, p < 0,05$). Les tests *post hoc* ont révélé une augmentation significative de la vitesse entre le PRE et le PST_CT ($p < 0,05$). L'analyse n'a révélé aucun effet du FB, ni aucune interaction.

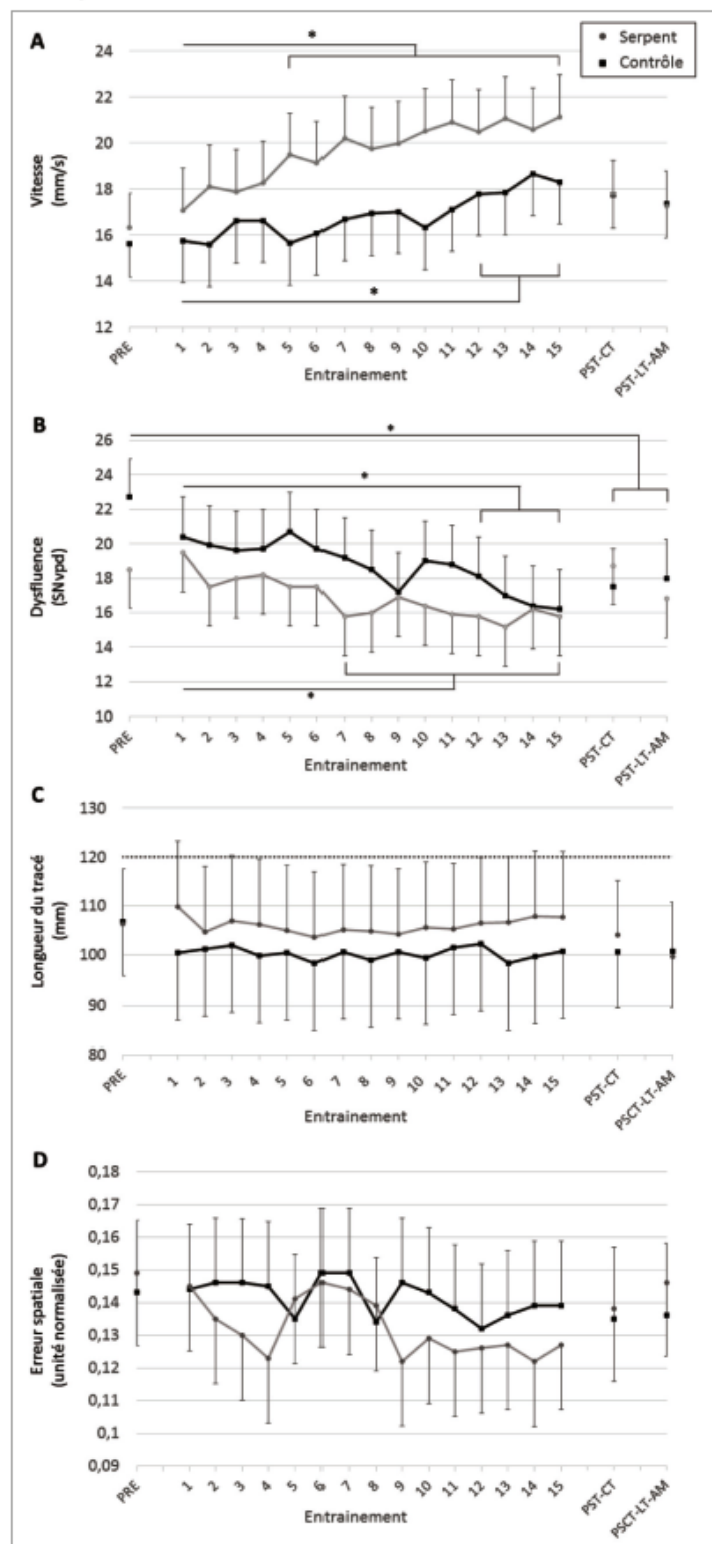
- *Comparaison des entraînements.* L'analyse a révélé un effet significatif de l'essai sur la vitesse ($F(14,860) = 4,59, p < 0,001$). Elle a également montré un effet significatif de la modification du FB sur la vitesse ($F(1,860) = 125,88, p < 0,001$). L'analyse des effets simples de l'essai avec le facteur FB en modérateur a révélé une augmentation significative de la vitesse à partir de l'essai 12 en condition « Contrôle » et à partir de l'essai cinq en condition « Serpent » (voir figure 3A).

Fluidité du mouvement

L'évolution moyenne de la dysflue est présentée sur la figure 3B. Pour rappel, plus cet indice est bas, plus le mouvement est fluide.

- *Comparaison des phases de test.* L'analyse a révélé un effet significatif de l'Apprentissage ($F(2,153) = 5,56, p < 0,01$), un effet tendanciel du FB ($F(2,152) = 2,93, p = 0,09$) en faveur de la condition « Serpent », et une interaction significative entre Apprentissage et FB ($F(2,152) = 3,88, p < 0,05$). Les tests *post hoc* ont révélé une différence significative entre le PRE et le PST_CT et le PRE et le PST_LT_AM. Cette différence statistique résulte d'une différence de fluidité dans le pré-test entre les caractères qui seront appris avec et sans modification du FB. Concernant les post-tests, il n'y a pas de diffé-

Figure 3. Évolution moyenne des caractéristiques de la performance d'écriture pendant les phases de test (PRE, PST_CT et PST_LT_AM) et d'entraînement. A) Vitesse moyenne, B) Dysflue, C) Longueur du tracé et D) Erreur spatiale. Les barres d'erreur correspondent à la variabilité inter-sujets.



rence significative à l'issue des deux conditions d'entraînement.

- *Comparaison des entraînements.* L'analyse a révélé un effet significatif de l'Essai ($F(14,860) = 4,51, p < 0,001$). L'analyse a également montré un effet significatif du FB ($F(1,860) = 40,05, p < 0,001$). L'analyse des effets simples de l'Essai avec le facteur FB en modérateur a révélé

une diminution significative à partir de l'essai 12 en condition « Contrôle » et à partir de l'essai 7 en condition « Serpent » (voir figure 3B).

Pression du stylet sur la tablette

- *Comparaison des phases de test.* L'analyse a révélé un effet significatif de l'Apprentissage ($F(2,156) = 4.60, p < 0.05$). L'analyse *post hoc* a révélé une augmentation significative entre le PRE et le PST_CT ($p < 0.05$) autour de 4 %, et un effet tendanciel entre le PRE et le PST_LT_AM ($p = 0.054$). L'analyse n'a pas révélé d'effet significatif du FB ni d'interaction Apprentissage * FB.

- *Comparaison des entraînements.* L'analyse a révélé un effet significatif du FB ($F(1,860) = 4.34, p < 0.05$) : les caractères appris en condition « Serpent » ont été écrits en appuyant légèrement plus fort sur la tablette que les caractères appris en condition « Contrôle ». L'analyse n'a pas révélé d'effet significatif de l'Essai ni d'interaction entre les facteurs.

Longueur du tracé

Pour rappel, la longueur du tracé correspond à la distance parcourue par le stylet pour compléter le caractère. L'évolution moyenne de la longueur du tracé au cours des phases de test et pendant les entraînements est présentée sur la figure 3C.

- *Comparaison des phases de test.* L'analyse a révélé un effet significatif de l'Apprentissage ($F(2,153) = 4.57, p < 0.05$). Les tests *post hoc* ont révélé une diminution significative de la longueur entre le PRE et le PST_LT_AM. Notons que la longueur de tracé est inférieure à la longueur des modèles, illustrée sur la figure par la ligne en pointillés. Enfin, l'analyse n'a pas révélé d'effet significatif du FB, ni aucune interaction entre les facteurs.

- *Comparaison des entraînements.* L'analyse a révélé un effet significatif du FB ($F(1,860) = 65.96, p < 0.001$) : la longueur est significativement plus élevée, donc plus proche de celle des modèles, dans la condition « Serpent » (figure 3C). Enfin, l'analyse n'a pas révélé d'effet significatif de l'Essai ni d'interaction.

Erreur spatiale

L'évolution moyenne de l'erreur spatiale au cours des phases de test et pendant les entraînements est présentée sur la figure 3D.

- *Comparaison des phases de test.* L'analyse n'a pas révélé d'effet significatif de l'Apprentissage ou du FB sur l'erreur spatiale. L'interaction Apprentissage * FB n'est également pas significative.

- *Comparaison des entraînements.* L'analyse a révélé un effet significatif du FB ($F(1,860) = 10.55, p < 0.001$) : l'erreur spatiale est en moyenne plus faible en condition Serpent qu'en condition Contrôle (voir figure 3D). Enfin, l'analyse n'a pas révélé d'effet significatif de l'Essai, ni d'interaction entre les facteurs.

Discussion

Les nouvelles technologies ouvrent un éventail de possibilités d'aide à l'apprentissage et à la rééducation de l'écriture, en modulant les FB sensoriels impliqués dans l'écriture ou en ajoutant des FB via d'autres canaux sensoriels disponibles. Dans l'étude pilote rapportée ici, nous avons testé l'effet de la suppression partielle de la trace écrite sur tablette numérique sur l'apprentissage de nouveaux caractères. Nous avons demandé à 16 participants adultes d'apprendre avec leur main non dominante quatre nouveaux caractères, dont deux avec modification du FB visuel (condition « Serpent ») et nous avons évalué leur apprentissage à plusieurs niveaux.

Dans une première analyse, nous souhaitons savoir si la suppression partielle de la trace impactait la mémorisation des caractères. Pour cela, les participants devaient retracer les caractères dont ils se souvenaient le lendemain de la tâche d'apprentissage. Nous avons observé que deux tiers des caractères écrits de mémoire étaient des caractères appris en condition « Serpent » mais ce premier résultat n'était pas significatif d'un point de vue statistique. Nous avons ensuite regardé si le caractère qui revenait spontanément le premier en mémoire des participants avait été entraîné en condition « Serpent ». C'est effectivement le cas puisque 10 participants sur les 13 ayant réussi à se souvenir d'au moins un caractère, se sont remémorés en premier un caractère appris en condition « Serpent ». Le fait de ne pas voir le caractère se former empêche le scripteur de comparer en temps réel leur production avec le modèle. Nous pouvons supposer que cela amène les scripteurs à maintenir en mémoire de travail une représentation visuelle du caractère construite avant de commencer à écrire, pour tracer et corriger leur mouvement en temps réel. Cette configuration mobiliserait probablement plus de ressources qu'en condition classique, où le contrôle visuel de la trace permet au sujet d'effectuer ces ajustements grâce à des allers-retours entre le modèle et la trace produite. Cette hypothèse fait écho à celle proposée par Van Doorn et Keuss (1992) à la suite de l'observation d'une augmentation de la latence dans le cas de l'écriture sans vision. Cette augmentation de latence serait liée au traitement supplémentaire d'informations en amont de l'action, traitement qui pourrait avoir un impact sur la récupération mnésique. Ce premier effet positif de la modification de la trace est cependant assez faible dans notre étude, probablement parce que le modèle du caractère restait affiché tout le long de l'essai, minimisant ce travail de mémorisation de la forme des caractères. Il pourrait donc être intéressant de moduler en même temps le retour visuel de la trace écrite avec celui du

modèle, car il a été montré que tracé et copie n'engendrent pas les mêmes processus et ne sont pas mémorisés de la même manière (Gonzalez et al., 2011).

Dans une seconde analyse, nous avons étudié les caractéristiques du mouvement d'écriture. Nous avons comparé les performances en post-tests à court et long termes par rapport au pré-test (avec présence du modèle). Les résultats ont révélé un effet principal de l'apprentissage avec cependant des performances en post-test proches de celles du pré-test, sans effet de la condition d'entraînement. Enfin, nous avons comparé les performances pendant les entraînements. L'analyse a révélé que les scripteurs sont plus rapides et plus fluides, après un nombre de répétitions moins important dans la condition « *Serpent* » par rapport à la condition « *Contrôle* ». Les scripteurs sont également plus précis et ont une taille d'écriture plus proche de celle du modèle en condition « *Serpent* ». Autrement dit, la suppression partielle de la trace semble accélérer le processus d'apprentissage à la fois au niveau cinématique (vitesse et dysfluence) et au niveau spatial (longueur de tracé et erreur spatiale). Enfin, la pression exercée sur la tablette est plus importante en condition « *Serpent* » qu'en condition « *Contrôle* ». Cette augmentation de pression peut s'expliquer par plusieurs hypothèses complémentaires. Une première serait que les sujets appuient plus fort avec la stratégie de maximiser les informations proprioceptives, comme proposée par Van Doorn, 1992 ; voir également Van Den Heuvel et collaborateurs, 1998). Une seconde hypothèse est que l'augmentation de pression résulterait de l'augmentation de vitesse d'écriture. Lorsque nous écrivons plus vite, plus de fibres musculaires sont recrutées pour augmenter les forces de déplacement du stylo. Cela peut augmenter l'activité des muscles impliqués dans la tenue du stylo et donc la pression exercée sur la tablette. Notons également que cette augmentation de vitesse peut être à l'origine de l'augmentation de la longueur de tracé en accord avec le principe d'isochronie (Viviani & Terzuolo 1982) selon lequel vitesse et taille d'écriture augmenteraient proportionnellement, maintenant le temps de production relativement constant indépendamment de la taille.

Pourquoi l'effet positif de la modification du FB visuel dans les phases d'entraînement disparaît lors des post-tests ?

Nos résultats ont montré que les effets bénéfiques de la condition « *Serpent* » disparaissent au moment du post-test, effectué pourtant juste après l'entraînement. Trois hypothèses peuvent expliquer ce résultat décevant. Premièrement, les conditions de tests s'effec-

tuaient toujours avec le retour visuel de la trace écrite. Nous pouvons donc supposer que le fait de voir à nouveau sa trace écrite après plusieurs répétitions sans, a perturbé le mode de contrôle mis en place avec l'entraînement en condition « *Serpent* ». Deuxièmement, les participants étaient explicitement informés des phases de test et la situation d'évaluation a probablement eu un effet négatif sur la performance. Selon la théorie du monitoring explicite (Beilock & Ramirez, 2011), des participants en situation stressante focalisent leur attention sur les différentes séquences de l'action à réaliser. Cela peut perturber les procédures automatisées, surtout lorsqu'un seul essai par caractère est effectué. Enfin, il est aussi possible que l'effet positif de l'entraînement avec FB visuel modifié ne soit pas transférable à la condition classique, à cause de la dépendance au FB sensoriel (Ronsse et al., 2011). Cependant, une manière de réduire cette dépendance est de moduler la fréquence du FB modifié, en modifiant la trace un essai sur deux. Cette stratégie a déjà été testée et validée dans le domaine de l'apprentissage moteur (Winstein & Schmidt, 1990).

Vaut-il mieux modifier le FB visuel ou ajouter un FB auditif en temps réel ?

La tâche d'apprentissage de nouveaux caractères de la présente étude est très proche de celle effectuée par Danna et collaborateurs (2015) dans le cadre de la « *sonification* » de l'écriture. La comparaison des résultats entre ces deux études révèle les avantages et inconvénients de chacune des deux méthodes. Au niveau cinématique, la progression des performances est moindre en condition « *Serpent* ». Cela peut s'expliquer par le fait que la « *sonification* » informait explicitement le scripteur sur sa vitesse d'exécution alors que la modification du FB visuel n'informe qu'implicitement sur la vitesse d'écriture. Cependant, si la « *sonification* » améliorait la vitesse de tracé, c'était au détriment de la précision spatiale qui était moindre dans les post-tests à court terme. Dans la présente étude, il y a une amélioration à la fois de la vitesse et de la précision. Enfin, notons que notre étude a été réalisée sur tablette numérique avec stylet. L'effet de la surface d'écriture doit être pris en considération. Guilbert et al. (2019) ont ainsi émis l'hypothèse que les adultes ou les enfants compensent la réduction des informations proprioceptives liée à une surface lisse en se fiant davantage aux informations visuelles. Dans notre étude, il est possible que la surface lisse de la tablette ait diminué l'apport des informations proprioceptives et ralenti le passage d'un contrôle centré sur la trace écrite à un contrôle centré sur le mouvement d'écriture. Ces différents résultats confirment dans tous les cas la complémentarité

rité des deux stratégies de modification des FB sensoriels (visuel et auditif), offrant ainsi des perspectives intéressantes en termes de soutien à l'apprentissage ou la rééducation de l'écriture à l'aide de méthodes multisensorielles.

Conclusion et perspectives

Cette étude pilote montre le potentiel intérêt de modifier le FB visuel dans l'apprentissage de l'écriture, tout du moins chez l'adulte. La suppression partielle d'information visuelle sur le produit de l'écriture amène le scripteur à plus focaliser son attention sur le processus. Il faut cependant vérifier que cet effet positif se transfère à des conditions d'écriture classiques telles que l'écriture sur papier. Pour cela, notons que la suppression d'informations visuelles pendant l'action peut également s'accompagner d'une augmentation d'informations visuelles post-actives. Cette perspective semble prometteuse sachant que Søvik et Teuling (1983) ont montré qu'un FB visuel supplémentaire sur les informations cinématiques est plus efficace lorsqu'il est donné en post-actif. Enfin, cette étude pilote ouvre la perspective de tester cet outil auprès d'enfants, tout en veillant à ce que cette suppression du FB ne soit pas au détriment de la performance, surtout chez les enfants plus jeunes pour lesquels le FB visuel semble crucial tant que la représentation de la forme des lettres n'est pas complète (Chartrel & Vinter, 2006).

RÉFÉRENCES

- Alamargot, 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.
- Bara, F., Gentaz, É., 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, 433-449.
- Baur, B., Fürholzer, W., Marquart, C., & Hermsdörfer, J. (2009). Auditory grip force feedback in the treatment of Writer's Cramp. *Journal of Hand Therapy*, 22(2), 163-170.
- Beilock, S.L., & Ramirez, G. (2011). On the Interplay of Emotion and Cognitive Control: Implications for Enhancing Academic Achievement. *Psychology of learning and motivation*, 55, 137.
- Bluteau, J., Coquillard, S., Payan, Y., & Gentaz, É. (2008). Haptic guidance improves the visuo-manual tracking of trajectories. *PLoS ONE* 3 : e1775. doi: 10.1371/journal.pone.0001775
- Bonneton-Botté, N., Guilbert, J., & Bara, F. (2019). L'écriture manuscrite : un apprentissage moteur spécifique. *A.N.A.E.*, 163(31), 722-729.
- 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, 45-65.
- Danna, J., Fontaine, M., Paz-Villagrán, V., Gondre, C., Thoret, E., Aramaki, M. et al. (2015). The effect of real-time auditory feedback on learning new characters. *Human Movement Science*, 43, 216-228.
- Danna, J., Paz-Villagrán, V., & Velay, J.-L. (2013). Signal-to-Noise velocity peak difference: a new method for evaluating the handwriting movement fluency in children with dysgraphia. *Research in Developmental Disabilities*, 34, 4375-4384.
- Danna, J., & Velay, J.-L. (2015). Basic and supplementary sensory feedback in handwriting. *Frontiers in Psychology* 6:169. doi: 10.3389/fpsyg.2015.00169
- Danna, J., & Velay, J.-L. (2017). Handwriting movement sonification: why and how? *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 47(2), 299-303.
- Effenberg, A.O. (2005). Movement sonification: Effects on perception and action. *IEEE Multimedia*, 12(2), 53-59.
- Effenberg, A.O., Schmitz, G., Baumann, F., Rosenhahn, B., & Kroeger, D. (2015). SoundScript-Supporting the acquisition of character writing by multisensory integration. *Open Psychology Journal*, 8, 230-237.
- Gallucci, M. (2019). *GAMLj: General analyses for linear models*. [jamovi module]. Retrieved from <https://gamlj.github.io/>
- Gonzalez, G., Anderson, J., Culmer, P., Burke, M.R., Mon-Williams, M., & Wilkie, R.M. (2011). Is tracing or copying better when learning to reproduce a pattern? *Experimental Brain Research*, 208, 459-465.
- 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, 999-1046.
- 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.
- Howell, D.C. (2016). *Fundamental statistics for the behavioral sciences*. 9th Ed. Cengage Learning.
- Huau, A., Jover, M., & Roussey, J. (2017). Difficultés associées et scolarisation des enfants dyslexiques. *La Nouvelle Revue de l'Adaptation et de la Scolarisation*, 77, 169-181.
- Jover, M., Ducrot, S., Huau, A., Bellocchi, S., Brun-Hémin, F., & Mancini, J. (2013). Les troubles moteurs chez les enfants dyslexiques : revue de travaux et perspectives. *Enfance*, 4, 323-347.
- Loup-Escande, E., Frenoy, R., Poplimont, G., Thouvenin, I., Gapenne, O., & Megalaki, O. (2017). Contributions of mixed reality in a calligraphy learning task: Effects of supplementary visual feedback and expertise on cognitive load, user experience and gestural performance. *Computers in Human Behavior*, 75, 42-49.
- Oldfield, R.C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9, 97-113.
- Palmis, S., Danna, J., Velay, J.-L., & Longcamp, M. (2017). Motor control of handwriting in the developing brain: A review. *Cognitive Neuropsychology*, 34, 187-204.
- Portier, S.J., & Van Galen, G.P. (1992). Immediate vs postponed visual feedback in practicing a handwriting task. *Human Movement Science*, 11, 563-592.
- R Core Team (2019). *R: A Language and environment for statistical computing*. (Version 3.6) [Computer software]. Retrieved from <https://cran.r-project.org/>.

- Ronsse, R., Puttemans, V., Coxon, J.P., Goble, D.J., Wagemans, J., Wenderoth, N. *et al.* (2011). Motor learning with augmented feedback: modality-dependent behavioral and neural consequences. *Cerebral Cortex*, *21*, 1283-1294.
- Scholz, D., Rohde, S., Nikmaram, N., Brückner, H.-P., Großbach, M., Rollnik, J.D., & Altenmüller, E.O. (2016). Sonification of arm movements in stroke rehabilitation – A novel approach in neurologic music therapy. *Frontiers in Neurology* *7*:106. doi: 10.3389/fneur.2016.00106
- Søvik, N., & Teulings, H.L. (1983). Real-time feedback of handwriting in a teaching program. *Acta Psychologica*, *54*, 285-291.
- The JAMOVI Project (2020). *Jamovi*. (Version 1.2) [Computer Software]. Retrieved from <https://www.jamovi.org>
- Van Den Heuvel, C.E., Van Galen, G.P., Teulings, H.-L., Van Gemmert A.W.A. (1998). Axial pen force increases with processing demands in handwriting. *Acta Psychologica*, *100*, 145-159.
- Van Doorn, R.R.A. (1992). Axial pen pressure during handwriting movements in conditions with and without vision. *Journal of Human Movement Studies*, *23*, 41-52.
- 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*, 269-286.
- Van Galen, G.P., Smyth, M.M., Meulenbroek, R.G.J., & Hylkema, H. (1989). The role of short-term memory and the motor-buffer in handwriting under visual and non-visual guidance. In R. Plamondon, C.Y. Suen, & M.L. Simner (eds.), *Computer Recognition and Human Production of Handwriting* (pp. 253-271). Singapore: WorldScientific.
- Van Galen, G.P., Portier, S.J., Smits-Engelsman, B.C.M., & Schomaker, L.R.B. (1993). Neuromotor noise and poor handwriting in children. *Acta Psychologica*, *82*, 161-178.
- Viviani, P., & Terzuolo, C. (1982). Trajectory determines movement dynamics. *Neuroscience*, *7*, 431-437.
- Von Holst, E., & Mittelstaedt, H. (1950). Das Reafferenzprinzip (Wechselwirkungen zwischen Zentralnervensystem und Peripherie). *Naturwissenschaften*, *37*, 464-76.
- Winstein, C.J., & Schmidt, R.A. (1990). Reduced frequency of knowledge of results enhances motor skill learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *16*(4), 677-691.