Effet du feedback visuel sur les principaux indices dynamiques du geste graphique et les habiletés de transcription chez les enfants de 5 ans

Hélène Labat[1], Jean Ecalle[2] et Annie Magnan[2]
[1] CY Cergy Paris Université, Lab Paragraphe, France
[2] Université Lyon 2, Lab EMC, France

Résumé. L'écriture de mots nécessite l'acquisition du code alphabétique et la maîtrise du geste graphique. L'objectif de cette étude est d'évaluer avec des enfants de 5 ans : (1) l'effet du feedback visuel dans l'exploration motrice des lettres sur le tracé de lettres ; (2) l'effet du développement des processus moteurs sur la transcription de pseudo-mots. Un design pré-test / entraînement (avec ou sans feedback visuel) / post-tests est utilisé. Les principaux indices dynamiques qui reflètent les processus moteurs sont identifiés et analysés.

Abstract. ***Effect of visual feedback on main dynamic cues in handwriting and transcription skills with kindergarten children*.** Word writing requires alphabetic code acquisition and motor gesture mastery. The aim of this study is to evaluate with 5 y. o. children (1) the effect of the visual feedback in a motor experience of letters on letter highlighting; (2) the effect of motor processes development on pseudo-word transcription. A pre-test / training (with or without visual feedback) / post-tests design is used. The main dynamic indicators that reflect the motor processes are identified and analysed.

1. Contexte théorique : apprendre à écrire

Écrire est une activité complexe qui articule trois niveaux de traitement : la lettre, le mot et le texte. En particulier, cette recherche s'intéresse à l'écriture de lettres dans un mot.

1.1. L'écriture de mots chez l'apprenant

Écrire ou transcrire un mot nécessite l'interaction entre deux processus cognitifs, orthographiques et moteurs (Berninger et Swanson, 1994). Deux voies peuvent être mobilisées pour la conversion orale-écrite. Si le mot est connu, la voie orthographique permet l'activation directe des représentations orthographiques dans le lexique mental (*spelling*, ex. /CHATON/). La voie phonologique est privilégiée pour épeler un mot chez l'apprenant, du fait que son lexique orthographique n'est pas encore constitué. Cette voie met en œuvre les règles de correspondances graphèmes-phonèmes (code alphabétique, ex. /CH/A/T/ON) (Rapp, Epstein et Tainturier, 2002).

Les processus moteurs sous-tendent les habiletés graphomotrices qui permettent l'exécution graphique des lettres (*handwriting*). L'évolution du contrôle des mouvements s'opère d'un mode rétroactif (contrôle juste après le tracé) vers un mode proactif (anticipation motrice sur le tracé) (Zesiger, 1995). Le contrôle rétroactif des mouvements est privilégié chez le scripteur débutant âgé de 5 ans (Meulenbroek et van Galen, 1986). L'expérience simultanée des feedbacks visuels et proprioceptifs, associée à une pratique répétée du tracé favorisent l'appariement de ces indices sensori-moteurs et l'intégration d'une représentation interne de l'action. Un changement graduel dans l'utilisation des feedbacks visuels et proprioceptifs est observé au cours du développement (Danna et Velay, 2015 pour une synthèse). Le jeune enfant est confronté très précocement à la forme visuelle des lettres (grâce aux activités de lecture partagée, prénom…). Puis, l'écriture de lettres permet une référence kinesthésique du mouvement et implique une réduction du contrôle visuel. Dans l'ensemble, l'utilisation des feedbacks sensori-moteurs diminue quand l'expertise augmente. A partir de 7 ans, le mode de contrôle des mouvements devient proactif grâce à un accès automatisé aux programmes moteurs qui deviennent efficients vers 9 ans (Meulenbroek et van Galen, 1986). Cependant, le contrôle proactif des mouvements n'est

© The Authors, published by EDP Sciences. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

pas exclusif chez le scripteur expert. L'utilisation d'un contrôle rétroactif ou proactif dépend du type de mouvement exécuté et de l'expertise du scripteur (Desmurget et Grafton, 2003).

L'écriture de lettres dans un mot mobilise des processus cognitifs distincts mais qui s'influencent mutuellement car ils s'appuient sur les mêmes ressources cognitives (Fayol et Miret, 2005). Selon la théorie capacitaire (McCutchen, 1996), la mémoire de travail a une capacité limitée ce qui nécessite d'automatiser les processus, notamment ceux de bas niveaux. Chez l'apprenant, le coût cognitif en mémoire de travail est particulièrement élevé pour écrire un mot car les processus orthographiques et moteurs ne sont pas encore automatisés. Avant 8 ans, l'interaction entre les processus est limitée. L'activation des processus est alors séquentielle et indépendante alors que l'expertise demande une activation quasi-simultanée des processus et une relation réciproque (Kandel et Perret, 2015). Entre 8 et 11 ans, les mouvements d'écriture deviennent automatisés et l'interaction avec les processus orthographiques augmente. Plusieurs études ont montré l'effet du degré d'automatisation des processus de bas niveaux (moteurs) sur la mise en œuvre des autres processus requis dans une tâche. En ce sens, (a) Bourdin et Fayol (1994) ont montré que le rappel de mots est plus élevé en modalité orale qu'en modalité écrite chez les enfants de 7 ans, contrairement aux adultes où aucune différence significative n'est identifiée entre les deux modalités de restitution ; (b) Alamargot et Morin (2021) ont mis en évidence une relation négative entre l'écriture de lettres dans l'ordre de l'alphabet et les erreurs en orthographe lexicale d'une dictée de texte chez les enfants de 9 ans. Les erreurs lexicales sont plus élevées lorsque les performances graphomotrices sont faibles ; (c) la fluence du geste graphique à 5 ans explique davantage de variance en expression écrite (4,1%) que les connaissances orthographiques (2,3% ; Puranik et Al Otaiba, 2012). Ainsi, agir sur l'automatisation des processus moteurs serait un levier pour améliorer la production écrite de mots, dans le sens où la maîtrise du geste graphique permettrait de libérer des ressources cognitives, pour la gestion de processus de plus haut niveau (Olive, Favart, Beauvais et Beauvais, 2009 ; Labat, 2019a).

1.2. 1.2. Comment étudier les processus moteurs ? le rôle du feedback visuel

L'analyse de l'évolution des indices statiques et dynamiques renseigne sur la qualité de l'écrit. En ce sens, l'usage de tablettes graphiques ou tactiles permet le recueil de paramètres dynamiques en temps réel (évaluation *on-line* : vitesse, pression ou durée du mouvement…) et l'analyse de la qualité du processus moteur et de son automatisation. Pour étudier la production écrite, cette approche est complémentaire aux mesures de précision et de lisibilité (évaluation statique *off-line* sur la taille par ex.).

Le tableau 1 présente des recherches qui comparent l'effet d'entraînements sur l'écriture de lettres (voir Labat, 2019a pour des détails). Elles mettent en œuvre un paradigme classique pré-test / entraînement / post-test et ciblent des enfants français âgés de 5 ans (sauf l'étude de Jolly et Gentaz (2013) qui concerne des enfants de CP en difficultés). Une diversité des paramètres dynamiques est observée dans ces études, bien que la tâche soit identique (copie de lettres). Ce constat amène à se poser des questions méthodologiques. Comment les mesures sont-elles sélectionnées ? Existe-t-il des relations entre ces mesures ? Et si oui, comment sélectionner les mesures à décrire, de manière qu'elles ne donnent pas une information redondante ? Dans la présente étude, nous proposons de laisser les données guider le choix des facteurs à analyser (approche *data driven*). Enfin, le tableau 1 montre que la pression n'est pas une mesure systématiquement analysée dans les recherches alors que les indices proprioceptifs (notamment tactile) sont impliqués dans le développement des processus moteurs.

Tableau 1. Exemples de recherches par ordre chronologique sur l'entraînement du geste graphique chez le jeune apprenant

Étude	Tâche	Résultats	Mesures
Palluel-Germain et al. (2007)	Copie de lettres	Dispositif bras robotisé (Télémaque) > copie sur papier ou ordinateur de lettres	pics*, pauses*, vitesse*
Vinter et Chartrel (2010)	Copie de lettres	Effet en fonction du groupe (groupes visuo-moteur, visuel ou moteur)	longueur, durée du tracé, vitesse, pics, qualité (lisibilité)
Bara et Gentaz (2011)	Copie de lettres	Entraînement visuo-haptique > visuel	Nombre et temps de levée de stylo, pics, ordre des mouvements, qualité (lisibilité)*
Jolly, Palluel-Germain et Gentaz, (2013) Jolly et Gentaz, (2013)	Dictée de lettres	tablette-stylet > papier-crayon	Nombre de traits, nombre et durée* de levée de crayon, durée du tracé*, pression, vitesse*, pics*, longueur*, nombre de moments statiques
Bara et Bonneton-Botté (2018)	Copie de lettres	Entraînement motricité globale > visuel	direction des mouvements*, nombre et durée des pauses, vitesse, fluence*, qualité (lisibilité)*

*$p<.05$

D'autres travaux ont étudié le rôle du feedback visuel (FV) sur le développement des processus moteurs. Pour cela, les auteurs ont manipulé la présence *versus* absence de vision pendant l'écriture de lettres et montrent que l'exécution du tracé s'appuie sur l'activation de programmes moteurs (en fonction du degré d'expertise du scripteur) et que les feedbacks proprioceptifs sont renforcés en absence de vision. Pour illustrer, (a) Chartrel et Vinter (2006) ont mis en évidence une évolution de la vitesse, de la longueur (taille des lettres) et de la fluidité (nombre de pics de vitesse pondéré par le nombre de segments) chez les enfants (8 à 10 ans) en situation d'écriture sans FV. Chez les adultes, seule la pression augmentait lorsque le FV n'était pas disponible. (b) Guilbert, Alamargot et Morin (2019) ont obtenu des résultats similaires. La pression tendait à augmenter en absence de FV (p=.06) pour l'ensemble des participants (7-8, 9-10 et des adultes). L'étude soulignait aussi que l'absence d'indices visuels conduisait à amplifier les feedbacks proprioceptifs lorsque le support était rugueux, ce qui n'était pas possible avec un support lisse ; (c) avec des enfants plus jeunes (5 ans), Bara et Bonneton-Botté (2021) ont identifié une réduction du nombre de levées de crayon et de la qualité des lettres et une augmentation de la vitesse, de la fluence et de la taille des lettres copiées en absence de vision.

Les feedbacks sensori-moteurs auraient des rôles complémentaires pour contrôler les mouvements d'écriture (Danna et Velay, 2015). Le FV est associé à la lisibilité de la trace écrite et aux caractéristiques spatiales des lettres (taille) car la vision permet la localisation précise du stylo sur la surface d'écriture. Pour contrôler les mouvements d'écriture, le scripteur utilise le feedback proprioceptif qui provient des muscles, des tendons et des articulations. Il regroupe les feedbacks kinesthésiques et tactiles obtenus pendant le tracé. Le feedback kinesthésique fournit des indices cinématiques et/ou dynamiques sur les mouvements d'écriture tandis que le feedback tactile (pression) venant des récepteurs de la peau indique les forces exercées pendant l'écriture (contraction des muscles sur le stylo).

2. Objectifs et hypothèses

L'objectif de cette recherche est double. Nous avons étudié chez les enfants de 5 ans :

(1) *l'effet du FV dans l'exploration motrice des lettres sur le tracé de lettres*. Les études présentées dans le tableau 1 ont évalué avec des enfants de 5 ans, soit l'apport d'un apprentissage proprioceptif des lettres, soit l'apport des nouvelles technologies sur le développement du geste graphique et de la production écrite. D'autres recherches ont étudié le rôle spécifique du FV mais les comparaisons inter-groupes d'âge limitent l'analyse de la dynamique développementale. Enfin, la pression n'est pas systématiquement mesurée avec les jeunes enfants, alors que cette mesure renseigne sur le feedback tactile nécessaire au développement des processus moteurs. En conséquence, la présente étude vise à décrire le développement précoce des processus moteurs avec une approche longitudinale à court terme et le rôle spécifique du FV dans ce développement. Nous prédisons que l'absence de FV entravera l'appariement des indices sensori-moteurs et le développement des processus moteurs, comparé au groupe avec FV.

De plus, les jeunes enfants ne disposeraient pas encore de représentations internes de l'action qui leur permettent de tracer les lettres et seraient d'autant plus dépendants des feedbacks sensori-moteurs. Conformément à la littérature (à partir de 7 ans), l'absence de FV sur le tracé pourrait conduire l'enfant à contrôler les mouvements d'écriture grâce à l'amplification des feedbacks proprioceptifs, notamment des feedbacks tactiles. Concrètement, une augmentation plus forte de la pression serait observée dans le groupe sans FV, comparé au groupe contrôle. Un résultat alternatif pourrait être une absence de compensation. L'interaction indiquerait alors une pression plus élevée pour le groupe avec FV. En effet, l'attention dédiée au traitement des informations proprioceptives serait plus faible dans le groupe sans FV car l'enfant serait moins engagé et focalisé sur l'objet d'apprentissage. La vision serait « prédominante » et les caractéristiques spatiales qu'elle fournit pourraient guider le tracé des lettres et permettre le développement d'une référence kinesthésique.

(2) *l'effet du développement des processus moteurs sur la transcription de pseudo-mots*. À notre connaissance, peu de travaux ont étudié les relations précoces entre les processus moteurs et orthographiques chez les jeunes enfants. Nous prédisons que la corrélation entre les scores de transcription de pseudo-mots et du tracé de lettres diminuera pour tendre vers une absence de lien, du fait d'une augmentation de l'automatisation des processus moteurs suite aux entraînements. Au final, les processus moteurs et orthographiques n'entreraient plus en compétition pour l'allocation des ressources cognitives nécessaire à la mise en œuvre. Dans le cas où ces processus ne seraient pas assez automatisés, alors l'activation sera séquentielle. Les analyses devraient alors indiquer une corrélation puisque les performances motrices seraient encore trop coûteuses. En ce sens, la littérature scientifique met en évidence une automatisation du geste graphique vers 9 ans.

3. Méthodologie de recherche

3.1. Participants

Trente-neuf enfants français de grande section de maternelle ont participé à l'étude (âge moyen= 67 mois ; é-t = 3.6). Le paradigme pré-test (t0) / entraînements / post-test 1 (après l'entraînement -t1) / post-test 2 (2 mois après le pré-test -t2-) est mis en œuvre. Après le pré-test, les enfants sont répartis dans deux groupes d'entraînement appariés sur l'âge, le raisonnement non verbal (subtest de la BREV « complétion de formes », Billard et al., 2006), la reconnaissance de lettres, le surlignage de lettres et la transcription (dictée) de pseudo-mots (*cf.* description ci-dessous des tâches expérimentales) (*ps*>.05). Le nombre de filles et de garçons est équilibré dans les deux groupes. Les entraînements différaient sur la présence de FV visuel (FV) *versus* absence (le stylo n'a plus d'encre) pendant le surlignage des lettres en situation papier-crayon.

3.2. Matériel et procédure

Les deux groupes (avec et sans FV) ont bénéficié de 5 séances d'entraînement et d'une séance de révision. À chaque séance, deux correspondances graphèmes-phonèmes sont apprises pendant 20 minutes en petits groupes de 4-6 enfants. Une séance commençait par un exercice phonologique (ex. présentation d'un mot qui commence par la lettre cible, *« voici la lettre p qui est au début de pomme »*, puis les enfants devaient proposer d'autres mots qui commencent par le même phonème) et se poursuivait par une activité de surlignage des consonnes cibles présentées en pointillés et en minuscule cursive avec un stylo qui écrit (groupe FV) ou non (groupe sans FV) selon le groupe d'entraînement de l'enfant. Chaque consonne est surlignée 4 fois. Dix consonnes sont apprises et évaluées (d, g, p, t, v, f, l, m, n et s).

Les enfants réalisent les tâches expérimentales suivantes :

Reconnaissance de lettres (t0). Le nombre de consonnes correctement reconnues est mesuré (max. 10).

Surlignage des lettres (t0, t1 et t2) sur une tablette digitale (Wacom-Intus 3, Ink Pen-ZP-130-00A). Treize paramètres[1] sont enregistrés avec les logiciels Scribble (Jolly et Gentaz, 2013) et Ductus (Guinet et Kandel, 2010) : longueur (en cm), temps (en sec), vitesse (en cm/sec), nombre de pics de vélocité, nombre et temps (en sec) des levés de crayon, nombre et temps (en sec) des mouvements lents, nombre et temps (en sec) des moments statiques, nombre et temps (en sec) des pauses et pression (en grammes).

Transcription de pseudo-mots (t0, t1 et t2). Le nombre de consonnes correctement écrites est mesuré (max. 20).

4. Résultats

Les données brutes aux deux tâches sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2. Moyennes (et écart-types) dans les tâches de surlignage de lettres (mesures dynamiques) et de transcription de pseudo-mots aux 3 sessions d'évaluation

	t0		t1		t2	
Surlignage de lettres						
Longueur moyenne (cm)	30.8	*(2.4)*	29.9	*(1)*	30.8	*(1.3)*
Temps total (sec)	17,6	*(6.7)*	13.7	*(4.5)*	13	*(3.5)*
Vitesse (cm/sec)	2	*(0.7)*	2.4	*(0.7)*	2.6	*(0.8)*
Nombre de pics de vélocité	52.6	*(24.3)*	37.8	*(14.7)*	38.2	*(13.5)*
Nombre de levés de crayon	1.3	*(1.3)*	0.9	*(0.3)*	0.9	*(0.5)*
Temps de levées de crayon (sec)	2.6	*(2.8)*	1.4	*(0.8)*	1.4	*(0.9)*
Nombre de mouvements lents	34.4	*(20.9)*	6.1	*(2.7)*	9.1	*(4.3)*
Temps des mouvements lents (sec)	5.4	*(5)*	0.8	*(0.5)*	1	*(0.6)*
Nombre de moments statiques	16.3	*(5.6)*	7.9	*(2.8)*	9.7	*(2.9)*
Temps des moments statiques (sec)	4	*(3.2)*	0.7	*(0.5)*	1	*(0.6)*
Nombre de pauses	2.5	*(1.9)*	0.6	*(0.7)*	1	*(0.8)*
Temps moyen des pauses (sec)	0.8	*(0.6)*	0.2	*(0.3)*	0.3	*(0.3)*
Pression (gram)	413	*(122.5)*	555.4	*(150.2)*	458.7	*(132.4)*
Transcription de pseudo-mots (/20)	10.9	*(4.7)*	12.7	*(4)*	12.9	*(4.6)*

[1] Nous remercions vivement Lucie Beauvais qui a extrait l'ensemble des données stockées sur les tablettes.

4.1. Quel est l'effet du feedback visuel sur l'apprentissage du tracé des lettres ?

Les principaux indicateurs dynamiques dans la tâche de surlignage de lettres sont identifiés grâce à une analyse en composantes principales (ACP) réalisée sur les données de tous les enfants et à chaque temps d'évaluation (N=39). L'ACP synthétise les informations importantes contenues dans les données multivariées en quelques nouvelles variables. Pour cela, elle transforme des variables corrélées entre elles en nouvelles variables décorrélées les unes des autres. Ces nouvelles variables sont nommées « composantes principales » ou « facteurs » et sont représentatives des mesures dynamiques de l'écriture.

Quatre facteurs sont mis en évidence dans notre étude. Ils expliquent 91,3 % de variance à t0, 86,9 % à t1 et 91,8 % à t2. Les variables contribuent à plus de .70 à chaque facteur. Dans l'ensemble, toutes les mesures (exceptée la pression) contribuent à chaque session au même facteur. De plus, la vitesse contribue positivement à une composante principale aux trois temps, contrairement aux autres mesures où la contribution est négative : temps total, nombre de pics de vélocité, nombre et temps de moments statiques, nombre et temps des mouvements lents, nombre et temps de pauses. La longueur et la pression contribuent à deux temps, soit de manière positive soit de manière négative.

Ainsi, trois facteurs sont retenus : un facteur général nommé « dysfluence », la vitesse et la pression. Le facteur de dysfluence intègre 9 indices dynamiques qui contribuent fortement à la variance totale aux 3 sessions (temps total, nombre de pics de vélocité, temps de crayon en l'air, nombre et temps des mouvements lents, nombre et temps des moments statiques et nombre et temps des pauses). Pour chaque enfant, un indice pondéré de dysfluence ($I_{Dysf)}$ est calculé[2]. Enfin, le facteur 4 (longueur) n'est pas intégré dans la suite des analyses au regard de la tâche proposée. En effet, il est demandé à l'enfant de surligner la forme de la lettre. La contrainte de ce modèle limite donc les variations de taille.

Ensuite, une ANOVA est conduite avec le facteur inter-sujet groupe (FV ou sans FV) et le facteur intra-sujet session (t0, t1 et t2). La comparaison entre t0 et t1 (pré-test et post-test 1) permet d'examiner l'apport du FV sur le développement des processus moteurs tandis que la comparaison entre t1 et t2 (post-tests 1 et 2) renseigne sur le maintien en mémoire à long terme des connaissances apprises. L'analyse a révélé un effet significatif de la session sur : (1) la dysfluence, $F(2,74) = 41.34$, $p < .0001$, $\eta_p^2 = .53$, la mesure diminue de .39 (t0) à .20 (t1), puis se maintient à .21 (t2); (2) la vitesse, $F(2,74) = 15.31$, $\eta_p^2 = .29$, $p < .0001$, la vitesse augmente de t0 à t2 (.38, .46, .50); (3) la pression, $F(2,74) = 26.18$, $\eta_p^2 = .41$, $p < .0001$, elle augmente de t0 à t1 puis diminue entre t1 et t2 (.44, .60, .49). L'effet principal du groupe et l'interaction groupe*session ne sont pas significatifs (ps>.05).

4.2. Est-ce que les performances aux deux tâches sont reliées ?

Les coefficients de corrélations entre les indices dynamiques de la tâche de surlignage de lettres (dysfluence, vitesse et pression) et le score de transcription de pseudo-mots sont calculés avec le test Bravais-Pearson à chaque session (tableau 3).

Tableau 3. Matrices de corrélation entre les indices dynamiques et la transcription de pseudo-mots à t0 (en bas à droite), t1 (en haut à gauche) et t2 (en haut à droite)

	1	2	3	4		1	2	3	4
1. I_{Dysf}		-.80*	.01	-.15			-.86*	-.02	.16
2. Speed	-.86*		.09	.05				.13	-.12
3. Pressure	.02	.01		.15					-.06
4. Transcription	-.04	-.01	-.09						

Note: I_{Dysf}: indice général de dysfluence

[2] Pour chaque enfant, nous avons calculé un indice pondéré de dysfluence en tenant compte du poids moyen de chaque mesure des trois sessions. Finalement, cet indice de dysfluence IDysf à chaque session pour chaque enfant est la somme des 9 scores bruts de dysfluence pondérés par le poids moyen (Pm) de la mesure sur la composante (facteur) « dysfluence » dans l'ACP ; puis cette somme est divisée par le maximum de IDysf (observé pendant les 3 sessions).
La formule est : $I_{dysf} = [(Pm_{Ttot} * Ttot) + (Pm_{nPV} * nPV) + (Pm_{tLC} * tLC) + (Pm_{nML} * nML) + (Pm_{tML} * tML) + (Pm_{nMS} * nMS) + (Pm_{tMS} * tMS) + (Pm_{nPa} * nPa) + (Pm_{tPa} * tPa) / Imax_{dysF}$
Notes. Pm : poids moyen ; Ttot : temps total ; nPV : nombre de pics de vitesse ; tLC : temps de levés de crayon ; nML : nombre de mouvements lents ; tML : temps des mouvements lents ; nMS : nombre de moments statiques ; tMS : temps des moments statiques ; nPa : nombre de pauses ; tPa : temps des pauses.

Les coefficients entre la vitesse et le facteur dysfluence sont négatifs et élevés aux trois sessions (*ps*<.001). Une dysfluence élevée est associée à une vitesse lente.

Les autres corrélations entre le score de transcription et les autres facteurs sont très faibles et non significatifs (*ps*>.05).

5. Discussion

Cette étude exploratoire vise à analyser chez les enfants de 5 ans : (1) l'effet du FV dans l'exploration motrice des lettres sur le tracé de lettres ; (2) l'effet du développement des processus moteurs sur la transcription de pseudo-mots.

5.1. Quel est l'effet du feedback visuel sur l'apprentissage du tracé des lettres ?

Basée sur la littérature scientifique, l'hypothèse posée était que l'absence de FV entraverait l'appariement des indices sensori-moteurs et le développement des processus moteurs, comparé au groupe avec FV (situation contrôle). Après l'entraînement, la fluence, la vitesse et la pression augmentent. À moyen terme (2 mois après le pré-test), la fluence du geste se maintient et la vitesse continue d'augmenter. Dans l'ensemble, les résultats indiquent que les processus moteurs sont plus automatisés grâce à la pratique du tracé des lettres, indépendamment de l'entraînement suivi. Dans cette étude, l'absence de FV ne semble pas avoir d'impact significatif sur l'apprentissage du tracé des lettres chez les jeunes enfants. Excepté pour la vitesse, nos résultats confirment ceux de Bara et Bonneton-Botté (2021) qui montrent que les enfants de 5 ans écrivent plus lentement et amplifient les indices dynamiques pour contrôler leurs tracés en absence de vision. Dans notre étude, une stratégie de « tread » (tracé en continu) pourrait s'être mise en place durant les séances d'entraînement car nos données montrent que la vitesse augmente et que le nombre et le temps de levés de crayon diminuent. Les enfants restent en contact avec le support pour mieux contrôler les trajectoires des mouvements. Une autre stratégie serait de compenser via la pression du stylo sur la feuille en l'absence d'informations visuelles. En ce sens, la littérature montre une augmentation de l'extraction des informations proprioceptives avec des enfants âgés de 7 à 10 ans (Chartrel et Vinter, 2006 ; Guilbert et al., 2019). Ce sont les adultes qui manifestent la pression la plus forte (Chartrel et Vinter, 2006). Dans notre étude, les enfants plus jeunes augmentent ces feedbacks, que les informations visuelles soient disponibles ou pas. Afin de mieux comprendre le rôle du FV sur le développement des appariements sensori-moteurs, d'autres recherches seraient nécessaires pour comparer les performances graphomotrices d'enfants au début de l'apprentissage du graphisme, par exemple à partir de 4 ans.

L'absence de différence significative entre les deux groupes pourrait s'expliquer, d'une part, par le matériel utilisé. Tout d'abord, la tâche de surlignage donne accès à un feedback visuel (même si le stylo n'écrit pas) puisque les lettres apparaissent en pointillés sur la feuille. Ainsi, l'appariement sensori-moteur dans le groupe sans FV reste possible, bien que le FV ne soit pas directement celui de l'enfant. Les deux entraînements peuvent donc contribuer au développement des processus moteurs. Ensuite, ce support présente des contraintes spatiales fortes (taille imposée des lettres), ce qui réduit la perception par les enfants des différents segments et de leurs dispositions dans l'espace graphique. Dans les recherches futures, une tâche de copie pourrait être plus appropriée pour libérer les enfants du modèle proposé (*"enable young children to free themselves from the models and help them to better program their movements"* Chartrel et Vinter, 2008, p. 537). D'autre part, l'attention dédiée au traitement des informations proprioceptives pourrait être plus faible en absence de vision. Chez le jeune scripteur, la vision serait « prédominante » et les caractéristiques spatiales qu'elle fournit seraient reliées au développement d'une référence kinesthésique. En ce sens, plusieurs recherches démontrent le rôle de la lecture sur le développement de l'écriture. Par exemple, la connaissance de l'alphabet (dénomination) explique la variance en écriture de lettres à 4-5 ans (Puranik, Lonigan et Kim, 2011). En utilisant un eye-tracker avec des enfants de 4 à 8 ans, l'étude de Fears et Lockman (2018) a évalué l'effet de la reconnaissance visuelle de formes sur leurs copies en fonction du degré de familiarité des enfants aux stimuli (lettres *versus* symboles). Les résultats révèlent que les jeunes enfants réalisent plus d'exploration visuelle (temps et nombre de fixations) que les enfants de 8 ans pour initier les mouvements, en particulier pour les symboles. Enfin, la reconnaissance et la manipulation des caractéristiques critiques des lettres sont corrélées avec la fluence d'écriture de lettres à 5 ans (Reutzel, Mohr et Jones, 2019). Cette explication complémentaire serait aussi compatible avec la diminution de la pression entre t1 et t2 dans notre étude. Lorsque l'attention visuelle ne serait plus dirigée vers l'objet d'apprentissage, alors l'utilisation des informations tactiles serait moindre, ce qui limiterait l'intégration d'une représentation interne de l'action. Un changement graduel dans l'utilisation des feedbacks visuels et proprioceptifs est ensuite observé au cours du développement (Danna et Velay, 2015 pour une synthèse). L'écriture de lettres permet une référence kinesthésique du mouvement qui implique une réduction du contrôle visuel.

Pour résumer, à partir de 7 ans, le scripteur pourrait déjà activer des programmes moteurs (en cours de développement) et adapterait son comportement en absence de vision en augmentant la pression (Chartrel et

Vinter, 2006 ; Guilbert et al., 2019). Chez le scripteur débutant, l'expérience du graphisme n'est pas encore suffisante pour que les programmes moteurs prennent le relai pour compenser le manque d'informations visuelles. Le contrôle des trajectoires est principalement rétro-actif et fortement dépendant des feedbacks sensori-moteurs (Danna et Velay, 2005). L'originalité de cette étude exploratoire est d'étudier le rôle du FV sur le développement précoce des processus moteurs avec une approche longitudinale et d'examiner des mesures décorrélées les unes des autres grâce à l'analyse en composantes principales. Aucune compensation n'est mise en évidence en réponse à l'absence de feedback visuel chez le jeune enfant. Ainsi, à partir de 7 ans, l'usage d'un contrôle pro- ou rétro-actif chez le scripteur ne semble pas exclusif mais coexiste. En absence de vision, la compensation pourrait être conditionnée par l'existence d'un réseau interconnecté contenant les propriétés multimodales des lettres (voir Labat, Ecalle et Magnan, 2010 pour illustrer le transfert inter-modal). Les informations proprioceptives pourraient aussi renseigner sur les caractéristiques spatiales des formes (intégrées initialement par la vision dès le plus jeune âge). Cette hypothèse serait compatible avec les nombreux travaux qui montrent le bénéfice d'une connaissance multisensorielle des lettres (visuelle et motrice (forme) et phonologique (nom et son)) sur l'apprentissage de la lecture-écriture (Labat et al., 2021 pour une synthèse). En d'autres termes, ils témoignent de l'effet de l'écriture des lettres (au doigt ou au crayon) sur la reconnaissance visuelle de lettres ou de mots.

5.2. Est-ce que les performances aux deux tâches sont reliées ?

Les corrélations entre le score de transcription et la vitesse ou la pression sont très faibles et non significatifs aux trois temps de passation. Les processus moteurs ne sembleraient pas assez automatisés suite à l'entraînement au surlignage de lettres pour s'activer quasi-simultanément avec les processus orthographiques pendant la transcription de pseudo-mots. Ce résultat est cohérent avec le fait que l'activation des processus est séquentielle et l'interaction entre les deux processus reste limitée avant 8 ans (Kandel et Perret, 2015). En ce sens, une dysfluence élevée est associée à une vitesse lente. Afin de contrôler l'exécution graphique, les jeunes enfants ralentissent le geste dans notre étude (Bara et Bonneton-Botté, 2021 pour un résultat similaire).

Plusieurs recherches montrent un effet *bottom-up* avec des enfants plus âgés, c'est-à-dire l'influence des processus de bas niveau (graphomotricité) sur les processus de plus haut niveau (ex. orthographe ; Bourdin et Fayol, 1994 ; Alamargot et Morin, 2021). Pour certains enfants, les habiletés graphomotrices seraient encore trop coûteuses et les processus moteurs et orthographiques entreraient en compétition pour l'allocation des ressources cognitives en mémoire de travail (McCutchen, 1996). Ainsi, l'automatisation des processus de bas niveau permettrait de libérer des ressources cognitives pour la mise en œuvre de processus de plus haut niveau (Olive et al., 2009 ; Labat, 2019a). Dans notre étude, plusieurs observations plaident en faveur de relations entre les processus moteurs et orthographiques. Elles restent à consolider avec l'apprentissage du graphisme car elles apparaissent faibles et non significatives. De manière descriptive et après l'entraînement : (1) une transcription plus élevée est associée à un geste graphique moins dysfluent ; (2) l'augmentation de la vitesse est reliée à celle de la transcription ; (3) une plus forte pression est associée à une meilleure transcription. Ces données vont dans le sens de l'étude de Puranik et Al Otaiba (2012) qui montrent que les variations entre les enfants de 5 ans en expression écrite s'expliquent principalement par la fluence du geste graphique.

Pour les études futures sur les relations entre les processus moteurs et orthographiques, il faudrait être vigilant sur le choix des tâches en analysant les processus cognitifs mobilisés (Labat, 2019b). En ce sens, Alamargot et Morin (2021) montent une corrélation négative entre les erreurs d'orthographe lexicale et l'écriture de lettres rappelées dans l'ordre de l'alphabet, cependant la corrélation n'est plus mise en évidence si la graphomotricité est évaluée via la copie de textes du BHK (échelle d'évaluation rapide de l'écriture de l'enfant, Charles et al., 2003 version française).

Pour conclure, la synthèse de Dinehart (2015) souligne l'intérêt d'apprendre le tracé des lettres dès le plus jeune âge car les habiletés graphomotrices sont un prédicteur puissant de la réussite académique future. Ainsi, dans une perspective de prévention et de remédiation des difficultés, l'un des enjeux sera de développer et de tester des programmes pour apprendre à tracer les lettres chez le scripteur débutant et/ou préparer à cet apprentissage (*readiness)*. La synthèse de Labat et ses collaborateurs (2021) recense de nombreux travaux menés ces dernières années. La littérature scientifique montre notamment que l'entraînement des processus moteurs contribue à l'apprentissage de la lecture-écriture (acquisition du principe alphabétique). De plus, le contexte d'apprentissage du tracé (supports et outils) conditionne les feedbacks visuels et proprioceptifs et influence les trajectoires d'apprentissage. Maximiser les informations sensori-motrices et proposer une exploration motrice liée à la forme pourraient constituer des recommandations pour l'enseignement du graphisme (voir aussi Ecalle, Navarro, Labat, Gomes, Cros et Magnan, 2016). Enfin, un feedback auditif peut également constituer une aide pour apprendre à lire-écrire (par ex., Ecalle, Boisson, Labat, Versace et Magnan, 2021 ; Danna et al., 2015). Peu de travaux sont identifiés dans le domaine de la production orthographique. Pourtant, dès 5-6 ans, l'apport d'un enseignement explicite est mis en évidence (Lavoie, Morin, Coallier et Alamargot, 2020). Pour pouvoir concevoir et tester des outils basés sur les preuves scientifiques, alors l'enjeu premier sera de mieux comprendre

le développement précoce des processus moteurs et orthographiques et leurs relations au cours du développement.

6. Références bibliographiques

Alamargot, D. et Morin, M. F. (2021). Relations entre habiletés graphomotrices et performances orthographiques : bilan des travaux et illustration chez des élèves français de 4e année du primaire. *ANAE-Approche Neuropsychologique des Apprentissages Chez L'enfant*, *170*, 35-44.

Bara, F. et Bonneton-Botté, N. (2021). Handwriting isolated cursive letters in young children: Effect of the visual trace deletion. *Learning and Instruction*, *74*, 101439.

Bara, F. et Bonneton-Botté, N. (2018). Learning letters with the whole body: visuomotor versus visual teaching in kindergarten. *Perceptual and Motor Skills*, *125*(1), 190-207.

Bara, F. et Gentaz, E. (2011). Haptics in teaching handwriting: The role of perceptual and visuo-motor skills. *Human movement science*, *30*(4), 745-759.

Berninger, V. W. et Swanson, H. L. (1994). Modifying Hayes and Flower's model of skilled writing to explain beginning and developing writing. Dans J. S. Carlson et E. C. Buttterfly (eds.), *Advances in Cognition and Educational Practice. Vol. 2: Children's Writing: Toward a Process Theory of the Development of SkilledWriting* (p. 57-81). Greenwich, CT: J.A.I. Press.

Billard, C., Ducot, B., Pinton, F., Coste-Zeitoun, D., Picard, S. et Warszawski, J. (2006). BREV, une batterie d'évaluation des fonctions cognitives : validation dans les troubles des apprentissages. *Archives de Pédiatrie, 13*(1), 23-31.

Bourdin, B. et Fayol, M. (1994). Is written production more difficult than oral production: A working memory approach. *International Journal of Psychology*, *29*, 591-620.

Charles, M., Soppelsa, R. et Albaret, J. M. (2003). *BHK-Échelle d'évaluation rapide de l'écriture de l'enfant*. Paris : Éditions du Centre de Psychologie Appliquée.

Chartrel, E. et Vinter, A. (2006). Rôle des informations visuelles dans la production de lettres cursives chez l'enfant et l'adulte. *L'Année psychologique*, *106*(1), 43-63.

Chartrel, E. et Vinter, A. (2008). The impact of spatio-temporal constraints on cursive letter handwriting in children. *Learning and Instruction, 18*(6), 537-547.

Danna, J. et Velay, J.-L. (2015). Basic and supplementary sensory feedback in handwriting. *Frontiers in Psychology, 6*, 169. https://doi.org/10.3389/ fpsyg.2015.00169

Danna, J., Fontaine, M., Paz-Villagrán, V., Gondre, C., Thoret, E., Aramaki, M., ... et Velay, J.-L. (2015). The effect of real-time auditory feedback on learning new characters. *Human movement science*, *43*, 216-228.

Desmurget, M. et Grafton, S. (2003). Feedback or feedforward control: End of a dichotomy. In S. H. Johnson-Frey (ed.), *Taking action: Cognitive neuroscience perspectives on intentional acts* (p. 289-338). The MIT Press.

Dinehart, L. H. (2015). Handwriting in early childhood education: Current research and future implications. *Journal of Early Childhood Literacy*, *15*(1), 97-118.

Ecalle, J., Boisson, A., Labat, H., Versace, R. et Magnan, A. (2021). Spatial sonification of letters on tablets to stimulate literacy skills and handwriting in 5 yo children: A pilot study. *Human Movement Science*, *79*, 102844.

Ecalle, J**.,** Navarro, M., Labat, H., Gomes, C., Cros, L. et Magnan, A. (2016). Concevoir des applications sur tablettes tactiles pour stimuler l'apprentissage de la lecture : avec quelles hypothèses scientifiques ? *Sticef, 23*(2). www.sticef.org; doi: 10.23709/sticef.23.2.

Fayol, M. et Miret, A. (2005). Écrire, orthographier et rédiger des textes. *Psychologie française*, *50*(3), 391-402.

Fears, N. E. et Lockman, J. J. (2018). How beginning handwriting is influenced by letter knowledge: Visual-motor coordination during children's form copying. *Journal of Experimental Child Psychology*, *171*, 55-70.

Guilbert, J., Alamargot, D. et 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.

Guinet, E. et Kandel, S. (2010). Ductus: A software package for the study of handwriting production. *Behavior research methods*, *42*(1), 326-332.

Jolly, C. et Gentaz, E. (2013). Évaluation des effets d'entraînements avec tablette tactile destinés à favoriser l'écriture de lettres cursives chez des enfants de Cours Préparatoire. *Revue des Sciences et Techniques de l'Information et de la Communication pour l'Éducation et la Formation*, *20*.

Jolly, C., Palluel-Germain, R. et Gentaz, É. (2013). Apprendre à écrire : évaluations des apports des interfaces haptiques ou tactiles dans des entraînements multisensoriels. Dans J. M. Albaret, M. L Kaiser et R. Soppelsa (dir.), *Troubles de l'écriture chez l'enfant : des modèles à l'intervention* (p. 115-133). Bruxelles : De Boeck.

Kandel, S. et Perret, C. (2015). How do movements to produce letters become automatic during writing acquisition? Investigating the development of motor anticipation. *International Journal of Behavioral Development*, *39*(2), 113-120.

Labat, H. (2019a). *Apprentissage multisensoriel des lettres : quel est le rôle de l'interface pour améliorer l'écriture du jeune enfant ? (1/2)*. Réseau CANOPé. https://www.reseau-canope.fr/agence-des-usages/apprentissage-multisensoriel-des-lettres-quel-est-le-role-de-linterface-pour-ameliorer-lecriture-du-jeune-enfant-12.html

Labat, H. (2019b). *Apprentissage multisensoriel des lettres : quel est le rôle de l'interface pour améliorer l'écriture du jeune enfant ? (2/2)*. Réseau CANOPé. https://www.reseau-canope.fr/agence-des-usages/apprentissage-multisensoriel-des-lettres-quel-est-le-role-de-linterface-pour-ameliorer-lecriture-du-jeune-enfant-22.html

Labat, H., Ecalle, J. et Magnan, A. (2010). Effet d'entraînements bi-modaux à la connaissance des lettres : approche développementale. *Psychologie Française, 55*(2), *113-127*.

Labat, H., Ecalle, J. et Magnan, A. (2021). Cognition incarnée et éducation : comment l'expérience sensori-motrice stimule l'apprentissage de la lecture-écriture ? *Intellectica, 74*(1), 253-270.

Lavoie, N., Morin, M.-F., Coallier, M. et Alamargot, D. (2020). An explicit multicomponent alphabet writing instruction program in grade 1 to improve writing skills. *European Journal of Psychology of Education*, *35*(2), 333-355.

McCutchen D. A. (1996). Capacity theory of writing: Working memory in composition. *Educational Psychology Review, 8,* 299-325.

Meulenbroek, R. G. J. et van Galen, G. P. (1986). Movement analysis of repetitive writing behaviour of first, second and third grade primary school children. Dans H. S. R. Kao, G. P. Van Galen et R. Hoosai (eds.), *Graphonomics: Contemporary Research in Handwriting* (p. 71–91). Amsterdam: Elsevier Science Publisher.

Olive, T., Favart, M., Beauvais, C. et Beauvais, L. (2009). Children's cognitive effort and fluency in writing: Effect of genre and of handwriting automatisation. *Learning and Instruction*, *19*, 299-308.

Palluel-Germain, R., Bara, F., De Boisferon, A. H., Hennion, B., Gouagout, P. et Gentaz, E. (2007). A visuo-haptic device-telemaque-increases kindergarten children's handwriting acquisition. Dans *Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WHC'07)* (p. 72-77). IEEE.

Puranik, C. S. et AlOtaiba, S. (2012). Examining the contribution of handwriting and spelling to written expression in kindergarten children. *Reading and Writing*, *25*(7), 1523-1546.

Puranik, C. S., Lonigan, C. J. et Kim, Y. S. (2011). Contributions of emergent literacy skills to name writing, letter writing, and spelling in preschool children. *Early Childhood Research Quarterly, 26*(4), 465-474.

Rapp, B., Epstein, C. et Tainturier, M. J. (2002). The integration of information across lexical and sublexical processes in spelling. *Cognitive neuropsychology*, *19*(1), 1-29.

Reutzel, P., Mohr, K. A. et Jones, C. D. (2019). Exploring the relationship between letter recognition and handwriting in early literacy development. *Journal of Early Childhood Literacy*, *19*(3), 349-374.

Vinter, A. et Chartrel, E. (2010). Effects of different types of learning on handwriting movements in young children. *Learning and Instruction*, *20*(6), 476-486.

Zesiger, P. (1995). *Écrire : Approches cognitive, neuropsychologique et développementale*. Paris : PUF.