



HAL
open science

Cognition incarnée et éducation : comment l'expérience sensori-motrice stimule l'apprentissage de la lecture – écriture ?

Hélène Labat, Jean Ecalle, Annie Magnan

► To cite this version:

Hélène Labat, Jean Ecalle, Annie Magnan. Cognition incarnée et éducation : comment l'expérience sensori-motrice stimule l'apprentissage de la lecture – écriture ?. *Intellectica - La revue de l'Association pour la Recherche sur les sciences de la Cognition (ARCo)*, 2021, 74 (1), pp.253-270. hal-04141913

HAL Id: hal-04141913

<https://hal.science/hal-04141913>

Submitted on 12 Oct 2023

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.

Cognition incarnée et Éducation : Comment l'expérience sensori-motrice stimule l'apprentissage de la lecture-écriture ?

Hélène LABAT*, Jean ÉCALLE[◇] & Annie MAGNAN[◇]

RÉSUMÉ. Plusieurs méthodes d'enseignement intègrent intuitivement l'exploration sensori-motrice dans les apprentissages scolaires. Afin de contribuer à l'essor de pratiques pédagogiques basées sur des preuves scientifiques (*evidence-based practices*), l'objectif de cette synthèse est d'examiner le rôle de l'exploration sensori-motrice sur l'apprentissage de la lecture-écriture en prenant en compte la diversité des environnements (supports et outils). En ce sens, à l'aide de dispositifs d'entraînement multisensoriel visant l'association d'explorations audio-visuelle et sensori-motrice des lettres, des études récentes en psychologie, en neuropsychologie et en neuro-imagerie, montrent que les processus moteurs contribuent à la reconnaissance visuelle et à l'écriture des lettres et des mots chez les enfants avec un développement neurotypique, des enfants en difficultés, ou chez les adultes. Ainsi, dans le domaine de l'éducation, l'approche incarnée de la cognition permet de rendre compte du développement des processus en lecture-écriture, où l'action motrice (kinesthésie, écriture) contribue à l'apprentissage des lettres. En effet, l'encodage enrichi de la lettre par l'expérience sensori-motrice facilite le rappel grâce à l'activation des états cognitifs d'expériences antérieures associés. Enfin, ces recherches montrent également que le type d'action produite par le sujet et le niveau de connaissances préalables contribuent à l'émergence de connaissances multimodales.

Mots-clés : Multimodalité, sensori-moteur, lettres, lecture, écriture, éducation, cognition incarnée.

ABSTRACT. Embodied Cognition and Education: How Does the Sensorimotor Experience Stimulate the Learning of Reading-Writing? Several teaching methods intuitively include the sensorimotor exploration into learning. In order to develop an evidence-based teaching practice, the aim of this synthesis is to demonstrate the role of sensorimotor exploration on the learning of reading and writing, taking into account the diversity of environments (materials and tools). By means of training devices aiming at the association of audio-visual and sensorimotor explorations of letters, studies in psychology, neuropsychology and neuroimaging show that motor processes contribute to the visual recognition and production of letters and words in children with a neurotypical development, children in difficulties or in adults. Consequently, in the field of education, the embodied approach of cognition makes it possible to account for the development of processes in reading-writing where sensorimotor action (kinaesthetic, writing) contributes to learning letters. Indeed, enriched encoding of the letter by the sensory-motor experience facilitates recall through activation of cognitive states of associated prior experiences. Finally, studies

* Laboratoire Paragraphe, CY Cergy Paris Université, Site de Gennevilliers, Gennevilliers, France. helene.labat@u-cergy.fr

[◇] Laboratoire d'Étude des Mécanismes Cognitifs, Université Lumière Lyon 2, Bron, France.

also show that the type of action produced by the subject and the level of prior knowledge contributes to the emergence of multimodal knowledge.

Keywords: Multimodality, sensory-motor, letters, reading, writing, education, embodied cognition.

INTRODUCTION

Plusieurs méthodes d'enseignement intègrent intuitivement l'exploration sensori-motrice dans les apprentissages scolaires. L'enjeu est de comprendre comment l'exploration sensori-motrice agit sur l'acquisition de connaissances. A l'heure actuelle, les environnements numériques sont très présents dans le milieu familial et scolaire, ce qui implique de nouvelles pratiques, notamment, pour apprendre le langage écrit. L'usage des nouvelles technologies faciliterait les apprentissages grâce à une présentation multimodale des informations (Amadiou & Tricot, 2014). Pour développer une pratique pédagogique basée sur les preuves scientifiques, l'objectif de cette synthèse est d'examiner le rôle de l'exploration sensori-motrice sur l'intégration multimodale des lettres et l'apprentissage de la lecture-écriture chez l'apprenant, en prenant en compte la diversité des environnements (supports et outils).

I – COGNITION INCARNÉE ET ÉDUCATION

Dans la littérature scientifique, deux approches peuvent être distinguées pour expliquer l'émergence des connaissances. L'approche computationnelle postule que les connaissances sont abstraites et décontextualisées de la situation d'apprentissage. Les représentations mentales et les règles symboliques constituent la base de la pensée. Dans cette conception classique de la cognition, le contenu des connaissances et la manière dont elles sont représentées en mémoire sont dissociés. La perception et l'action correspondent à des étapes d'entrée (processus *bottom-up*) et de sortie (*top-down*) des traitements cognitifs et ne sont pas des propriétés de la représentation en elle-même.

La cognition située et incarnée constitue une approche alternative. En psychologie, elle fait encore l'objet de débats (Versace, Brouillet & Vallet, 2018). Les chercheurs se situant dans le cadre de la cognition incarnée s'accordent sur l'idée que les représentations mentales ne sont pas neutres, amodales et décontextualisées. La cognition est située car les connaissances sont dépendantes de la situation d'encodage. Le contexte environnemental implique la perception et/ou l'action du sujet. Ainsi, les représentations sont incarnées à cause de leurs propriétés perceptives (par ex., vision, audition), motrices (par ex., mouvement, proprioception) et introspectives (par ex., états mentaux, affects, Barsalou, 2008). Contrairement à l'approche classique de la cognition, les expériences sensori-motrices constituent la structure même de la pensée selon les approches incarnées (Barsalou, 2008 ; Varela, Thompson, & Rosch, 1993 ; Wilson, 2002). Varela et ses collaborateurs (1993) postulent une inscription corporelle de l'esprit où le développement de la cognition résulte de l'interaction continue entre le sujet et l'environnement. L'individu et l'environnement forment une entité unifiée insécable. Ainsi, les connaissances dépendent de et sont contraintes par les interactions entre le corps et l'environnement (Chandler & Tricot, 2015). D'un côté, la mémoire et la perception guident l'action, et d'un autre côté, l'expérience de l'environnement

modifie les connaissances en mémoire. Barsalou (2008) souligne les liens étroits entre les systèmes cérébraux sensoriels et moteurs. L'expérience du corps, du monde et de l'esprit implique une capture des propriétés perceptives, motrices, et introspectives, qui sont ensuite intégrées à une représentation multimodale stockée en mémoire. La présentation ultérieure d'une propriété active l'ensemble de la représentation multimodale élaborée grâce aux expériences passées et simule sous forme d'image mentale les autres propriétés. Dans cette perspective, des modèles se sont développés dans le domaine de la mémoire pour expliquer l'émergence des connaissances et décrire les mécanismes impliqués, tel que le modèle d'Activation-Intégration (Act-In ; Versace, Vallet, Riou, Lesourd, Labeye & Brunel, 2014). De nombreux travaux expérimentaux sont menés dans le cadre de ce modèle. La plupart d'entre eux sont réalisés auprès d'adultes sur l'émergence de connaissances sur les objets (Versace *et al.*, 2018). Certaines de ces recherches ont montré l'apport d'un apprentissage multimodal et la nature modale des traces mnésiques créées. Par exemple, l'étude de Brunel, Labeye, Lesourd, et Versace (2009) a montré que la présentation visuelle d'une forme géométrique en phase test facilitait le traitement du son correspondant (effet de priming), après un apprentissage en double modalité (audio-visuelle), comparé à un apprentissage seulement visuel.

Ces dernières années, l'approche de la cognition incarnée est considérée afin de rendre compte de l'apprentissage de formes spécifiques en deux dimensions chez l'enfant. Les objets d'apprentissage concernent alors le nombre (par ex., Ruiter, Loyens, & Paas, 2015) ou la lettre (par ex., Longcamp, Laguarrigue, & Velay, 2010 pour une synthèse). Cependant, de manière générale, la recherche auprès d'enfants nécessite de prendre en compte la dimension développementale, les acquisitions résultent alors de l'interaction entre la situation d'apprentissage et le niveau développemental du sujet. Ainsi, l'un des enjeux de la recherche en cognition incarnée, telle qu'elle est conceptualisée chez l'adulte, sera de déterminer si elle peut rendre compte aussi de l'émergence des connaissances chez l'enfant. Cette synthèse examine un aspect spécifique de la cognition incarnée correspondant à l'apport d'une exploration sensori-motrice pour apprendre à lire-écrire (voir Bara & Tricot, 2018 pour une synthèse générale). Les modalités visuelle et auditive sont donc sollicitées pour apprendre les lettres (forme, nom et son). De plus, nous verrons que l'exploration sensori/kinesthésique-motrice favorise l'apprentissage du tracé et de la forme des lettres. Les termes qui peuvent référer à l'exploration sensori-motrice diffèrent selon les domaines d'étude et les auteurs. Nous conserverons les termes utilisés par les auteurs lors de la présentation des recherches. La connaissance multimodale des lettres permettrait d'expliquer, par exemple, que la connaissance motrice du tracé des lettres contribue à leur reconnaissance visuelle. La motricité est conçue dans cette synthèse comme un vecteur d'informations multimodales. Les recherches décrites ci-après apportent des pistes de réflexions sur le rôle des interactions entre l'environnement et le sujet pour apprendre à lire-écrire.

II – L’ENCODAGE MULTIMODAL DES LETTRES POUR RENFORCER LA LECTURE-ÉCRITURE

Après avoir défini brièvement l’apprentissage de la lecture et de l’écriture, des travaux utilisant une présentation multimodale des lettres seront présentés pour montrer comment l’exploration sensori-motrice agit sur l’intégration multimodale des lettres, la lecture et l’écriture.

II.1 - Effet d’une exploration sensori-motrice sur la lecture

La finalité de la lecture est d’accéder au sens à partir d’un texte écrit (Magnan & Ecalle, 2018). Deux composantes influencent le niveau de compréhension en lecture : la reconnaissance de mots écrits et la compréhension générale non spécifique à la lecture (Gough & Tunmer, 1986). Si de nombreux travaux sur la compréhension ont été menés dans le cadre de la cognition incarnée (par ex., Zwaan, Madden, Yaxley & Aveyard, 2004), on recense moins de travaux sur la reconnaissance de mots (par ex., Perfetti & Tan, 2013). En effet, les modèles en reconnaissance de mots se basent sur une approche classique de la cognition. Parmi les modèles computo-symboliques, le plus connu est le modèle DRC (Dual Route Cascaded Model ; Coltheart, Curtis, Atkins & Haller, 1993) qui influence toujours aujourd’hui la conception de l’évaluation et de l’apprentissage de la lecture. La reconnaissance de mots nécessite le stockage et le développement de connexions entre les représentations orthographiques, phonologiques et sémantiques dans le lexique mental (Magnan & Ecalle, 2018). Deux voies sont décrites pour identifier un mot écrit (Coltheart *et al.*, 1993 ; voir Perry, Ziegler & Zorzi, 2007 pour un modèle connexionniste). La voie orthographique permet un accès direct à la représentation phonologique du mot en mémoire (/LAPIN/) tandis que la voie phonologique nécessite l’acquisition du principe alphabétique, c’est-à-dire du système de règles de correspondances entre les graphèmes (*i.e.*, plus petites unités graphiques du système d’écriture) et les phonèmes (*i.e.*, représentations mentales correspondantes). Chez l’apprenant, le développement de la voie phonologique (/L/A/P/IN/) s’avère être une étape primordiale car le décodage phonologique favorise par auto-apprentissage le stockage des représentations orthographiques et la lecture experte (/LAPIN/) (Share, 1999). La reconnaissance des lettres est requise aux premières étapes de traitement du mot dans les deux voies de lecture (niveau prélexical). La connaissance des lettres (nom, son, forme) est l’une des compétences précoces les plus prédictives du niveau en lecture-écriture (Foulin, 2005). Ces trois dimensions apparaissent compatibles avec l’idée d’une représentation multimodale des lettres stockée en mémoire incluant des propriétés visuelles (forme), auditives (nom et son) et sensori-motrices (écriture).

Dans les premières publications en psychologie, la conception incarnée de la cognition n’était pas revendiquée pour expliquer l’apport d’un apprentissage multimodal des lettres (par ex., Gentaz, Colé & Bara, 2003 ; Bara, Gentaz & Colé, 2007). Elles soulignaient plutôt la mobilisation intuitive du corps dans plusieurs méthodes d’enseignement et visaient à mieux comprendre l’intérêt d’une telle pratique pour apprendre. Par exemple, Maria Montessori (1915) a développé une méthode pour favoriser le développement de l’enfant et les apprentissages scolaires. L’environnement (classe et matériel) occupe une

place centrale dans cette approche pédagogique. L'apprentissage se fait grâce aux sensations contrastées du matériel manipulé pendant l'activité (couleur, poids, forme, texture, taille, son, odeur, température). L'aménagement de l'espace permet à l'enfant d'être autonome et stimule sa curiosité. Il est libre d'être en mouvement et de choisir son activité. Les symboles alphabétiques sont appris grâce au traçage avec deux doigts de lettres rugueuses en papier de verre ou de lettres dans le sable. Les chercheurs ont alors étudié expérimentalement le rôle d'une exploration sensori-motrice sur l'apprentissage des lettres, de la lecture et de l'écriture (synthèses de Longcamp *et al.*, 2010 ; Labat, Ecalle & Magnan, 2017) ou, plus largement l'impact d'un enseignement intégrant une exploration sensori-motrice sur l'acquisition de connaissances scolaires (Lillard, Heise, Richey, Tong, Hart & Bray, 2017 pour la méthode Montessori). Suite aux nombreux résultats convergents, la conception incarnée de la cognition est alors explicitement discutée dans certains écrits pour rendre compte, en particulier, de l'effet positif des mouvements d'écriture sur la reconnaissance visuelle des lettres (par ex., Longcamp *et al.*, 2010). Les travaux présentés ci-dessous montrent que les processus moteurs contribuent à la reconnaissance visuelle de lettres et de mots chez les enfants pré-lecteurs de 5-6 ans (*i.e.*, avant l'apprentissage formel de la lecture en France), les patients avec alexie ou les adultes (Longcamp *et al.*, 2010 ; Labat *et al.*, 2017 pour des synthèses).

II.1.1 - Les recherches en psychologie

L'effet positif d'une exploration sensori-motrice sera décrit sur l'utilisation des correspondances grapho-phonémiques puis sur la reconnaissance visuelle de lettres. Classiquement, en psychologie expérimentale, un paradigme pré-test/constitution de groupes comparables / entraînement / post-test(s) est utilisé avec les enfants pré-lecteurs.

L'étude principes de Gentaz et ses collaborateurs (2003) a montré une amélioration des scores en décodage plus élevée après un entraînement contenant une exploration supplémentaire haptique (*i.e.*, toucher actif de la forme où la perception cutanée et l'action ne sont pas dissociables ; Gentaz, 2009) qu'après un entraînement audio-visuel classique avec des enfants au développement neurotypique âgés de 5 ans. Auprès d'enfants à risque de difficultés (Bara *et al.*, 2007), un effet similaire a été obtenu pour l'apprentissage des lettres et le développement des habiletés phonologiques, deux connaissances nécessaires pour apprendre à lire et à écrire (Foulin, 2005). L'exploration haptique permettrait un « bond-effect » qui renforcerait le développement des connexions écrit-oral (Fredembach, Hillairet de Boisferon & Gentaz, 2009). En effet, les modalités auditive et visuelle partagent des traitements communs avec la modalité haptique. D'un côté, les explorations haptique (*via* une procédure de suivi de contours de la forme) et auditive impliquent un traitement analytique alors que les explorations haptique (*i.e.* enveloppement dans la main) et visuelle permettent un traitement plus global (Gentaz, 2009). Le double traitement inhérent à l'exploration haptique permettrait d'établir « un pont » entre les différentes modalités sensorielles et renforcerait l'intégration multimodale (Fredembach *et al.*, 2009). Ainsi, le type de support (lettres en relief ou en creux) pourrait contraindre les procédures exploratoires et un double traitement (analytique et global) s'avérerait plus

efficace sur l'apprentissage du décodage qu'un traitement unique de suivi de contours de la lettre (Bara, Fredembach & Gentaz, 2010 ; Labat, Vallet, Ecalle & Magnan, 2015).

Certaines études ont également montré le rôle essentiel du geste graphique et de sa maîtrise sur l'apprentissage du décodage. Deux explorations sensori-motrices peuvent être ici distinguées. L'exploration haptique (tracé au doigt) permet d'extraire directement les informations kinesthésiques tandis que l'exploration graphomotrice (tracé au crayon) requiert l'usage d'un outil médiateur. Labat et ses collaborateurs (2015) ont comparé l'impact de cinq entraînements sur le décodage. L'encodage de la forme des lettres était uni-modal dans les groupes visuel (regarder la lettre), haptique (toucher la lettre avec son index en absence de vision) et graphomoteur (surligner la lettre avec un crayon en absence de vision) ou bi-modal dans les groupes visuo-haptique (toucher et regarder la lettre) et visuo-graphomoteur (surligner la lettre avec un crayon en présence de vision). Le nombre de lettres correctement lues était plus élevé dans les groupes avec encodage bi-modal comparativement aux trois groupes avec encodage uni-modal. Ainsi, l'acquisition du principe alphabétique ne dépendrait pas de l'outil utilisé (doigt ou crayon) durant l'exploration de la forme des lettres. Les résultats ont aussi confirmé l'apport d'une exploration kinesthésique sur le développement de la voie phonologique (par ex., Gentaz *et al.*, 2003). Labat, Boisson, Brunel, Ecalle, Versace et Magnan (2020) ont évalué l'effet d'un apprentissage implicite, où les enfants devaient explorer la forme de la lettre de manière visuelle (voir la dynamique du tracé) ou visuo-motrice (tracer sur l'écran de l'ordinateur avec son doigt). Simultanément, la syllabe était présentée oralement à l'enfant de manière incidente. L'apprentissage implicite mobilise peu de ressources cognitives (comparé à l'apprentissage explicite). Seule l'attention sélective est sollicitée pour explorer la forme, sans besoin d'un focus intentionnel sur l'apprentissage des correspondances écrites-orales (Perruchet & Vinter, 2002). La réduction des erreurs était supérieure après l'apprentissage visuo-moteur, comparée à l'apprentissage visuel. Ce résultat suggère que ce serait le geste qui renforcerait la discrimination et le rappel des associations audio-visuelles plutôt que l'information dynamique visuelle. Enfin, un apprentissage implicite semble possible pour débiter l'acquisition du principe alphabétique chez les enfants pré-lecteurs, avant l'enseignement explicite et systématique en école élémentaire. Enfin, Mayer, Wallner, Budde-Spengler, Braunert, Arndt et Kiefer (2020) ont comparé les effets de trois apprentissages à l'écriture de lettres sur la lecture de mots. Le nombre de mots correctement lus était significativement inférieur pour le groupe « stylet-tablette », comparé aux groupes « papier-crayon » et « clavier-tablette ». Pour les auteurs, la supériorité de l'apprentissage « clavier-tablette » s'expliquerait par la facilité des programmes moteurs à intégrer. Dans ce contexte, bien que les scores entre les situations « papier-crayon » et « clavier-tablette » ne diffèrent pas significativement, l'exploration sensori-motrice serait dépendante de chaque environnement, ce qui impliquerait le développement de processus moteurs différents. Dans les contextes « papier-crayon » et « stylet-tablette », les gestes graphiques seraient spécifiques à chaque lettre. L'apprentissage serait facilité dans le contexte « papier-crayon » pour les jeunes enfants car la friction de

l'outil sur le support serait supérieure à celle du contexte « stylet-tablette » (partie II.2.2 pour une discussion détaillée).

D'autres études ont été menées sur la reconnaissance de lettres. Longcamp, Zerbato-Poudou et Velay (2005) ont comparé l'impact de deux entraînements à l'écriture sur la connaissance de l'orientation des lettres. À 5 ans, une progression supérieure en reconnaissance visuelle de lettres après l'écriture manuscrite était observée comparée à l'écriture au clavier. De même, le nombre de lettres correctement identifiées par des enfants de 5 ans était plus élevé dans la situation d'apprentissage « papier-crayon » que dans la situation « clavier-tablette » (Mayer *et al.*, 2020). Cependant, l'effet en faveur de l'écriture manuscrite n'était pas retrouvé avec des enfants de 4 ans (Longcamp *et al.*, 2005). En effet, Kiefer, Schuler, Mayer, Trumpp, Hille et Sachse (2015) ont comparé l'influence de deux entraînements phonologiques et à la connaissance des lettres avec des enfants de 4-6 ans. La forme des lettres était apprise via l'écriture manuscrite (surlignage) ou l'écriture au clavier. Aucune différence significative n'était mise en évidence entre les deux groupes sur la reconnaissance et la dénomination de lettres. Les résultats de ces recherches suggèrent que les gestes graphiques ne seraient pas suffisamment automatisés pour contribuer à la reconnaissance des lettres chez les très jeunes enfants. Enfin, Bara et Bonneton-Botté (2018) ont évalué l'impact d'un entraînement à la motricité globale sur la reconnaissance visuelle de lettres. Les enfants de 5 ans devaient tracer avec le bras dans les airs les lettres (yeux ouverts puis fermés), et marcher sur les contours de la lettre tracée au sol. Les résultats sont comparés à un groupe « visuel », où les enfants devaient regarder attentivement la lettre. Les résultats indiquaient que le groupe « motricité globale » améliorerait davantage la reconnaissance de lettres que le groupe « visuel ». En résumé, les recherches en psychologie ont montré que la lecture de mots ou la reconnaissance des lettres pouvaient s'améliorer non seulement après un entraînement à la motricité fine (tracé au doigt ou au crayon ; par ex., Gentaz *et al.*, 2003 ; Longcamp *et al.*, 2005 ; Labat *et al.*, 2015) mais aussi après un entraînement où l'ensemble du corps était engagé (Bara & Bonneton-Botté, 2018).

II.1.2 - Les recherches en neuropsychologie

En neuropsychologie, l'apport d'une connaissance motrice des lettres est démontré auprès de patients avec alexie. L'alexie pure est un trouble neurologique qui se traduit par une lecture très lente et laborieuse, en dehors de toute autre atteinte du langage, et fait suite à une lésion cérébrale (Déjerine, 1892). Seki, Yajima et Sugishita, (1995) ont étudié l'effet d'une rééducation basée sur le traçage des lettres au doigt et au crayon. Une amélioration de la précision en lecture de lettres et de mots simples, sans que les mouvements d'écriture soient réalisés simultanément, était mise en évidence. Les performances d'un patient présentant une lésion cérébrale temporo-pariétale gauche (*i.e.*, lobes impliqués dans le traitement des lettres et des mots) suggèrent un encodage visuel et moteur séparé des lettres (Bartolomeo, Bachoud-Lévi, Chokron & Degos, 2002). En effet, les capacités d'imagerie mentale visuelle de ce patient étaient déficitaires tandis que ses connaissances motrices étaient relativement préservées, ce qui lui permettait de dénommer la lettre après avoir tracé la forme. Ainsi, et conformément à l'approche incarnée

de la cognition, ces études témoignent des relations entre perception et action (Barsalou, 2008), et en particulier de l'effet de l'action sur la perception de lettres. Enfin, Schubert, Reilhac et McCloskey (2018) a montré le rôle bénéfique de l'information dynamique. L'effet de trois remédiations visuelles dynamiques a été comparé (comparé à un groupe « visuel statique ») : voir l'écriture de la lettre dans le sens conventionnel, en sens inverse ou dans un ordre aléatoire. L'identification visuelle de lettres s'améliorait davantage après la remédiation où le patient alexique regardait la lettre s'écrire dans le sens conventionnel, comparée aux autres groupes, car la présentation dynamique était conforme aux connaissances motrices préservées du patient.

II.1.3 - Les recherches en neurosciences cognitives

Chez des adultes, l'apprentissage de formes grâce à l'écriture manuscrite s'accompagne de modifications neuronales, différentes de l'écriture au clavier (Longcamp *et al.*, 2008). Lors de la présentation visuelle de symboles, les enregistrements en imagerie cérébrale révèlent une activation des aires motrices, ce qui plaide en faveur de la nature modale et incarnée de cette connaissance. Chez des enfants de 5 ans, James et Engelhardt (2012) ont comparé trois types d'apprentissage à l'écriture de lettres : écrire différents allographes, c'est-à-dire les différentes formes graphiques d'une même lettre (situation qualifiée de *handwriting*), écrire au clavier ou tracer (*i.e.*, surligner la lettre écrite en pointillée). Un effet plus élevé du *handwriting* était observé sur le développement de la catégorisation des lettres grâce à une meilleure abstraction des caractéristiques invariantes entre les allographes. De plus, comparé aux deux autres apprentissages, le circuit neuronal de la lecture s'activait davantage après le *handwriting*. La contribution de l'écriture à la lecture s'explique par un recouvrement partiel des réseaux cérébraux de la perception et de la production des lettres : la perception mobilise des régions motrices et la production fait appel à des régions visuelles dédiées au traitement des lettres (James & Gauthier, 2006).

Pour résumer, les recherches issues de trois domaines (psychologie, neuropsychologie, et neurosciences cognitives) montrent l'intérêt d'un encodage multimodal des lettres pour apprendre à lire. L'exploration sensori-motrice de la forme des lettres contribue au développement de la voie phonologique et à l'apprentissage des lettres. En particulier, les effets observés dépendent de la manière dont l'apprenant a agi sur l'environnement au cours de l'apprentissage.

II.2 - Effet d'une exploration sensori-motrice sur l'écriture

Écrire un mot nécessite l'interaction entre deux processus, orthographiques et moteurs (*i.e.*, transcription ; Berninger & Swanson, 1994 ; Kandel & Perret, 2015). Les processus orthographiques réfèrent à la connaissance des relations entre l'écrit et l'oral (par ex., Coltheart *et al.*, 1993 pour une description des deux voies qui diffèrent sur la taille des unités traitées). En particulier, l'acquisition du principe alphabétique est nécessaire pour lire ou écrire un mot chez le scripteur débutant. L'apprentissage du geste graphique nécessite le développement de programmes moteurs automatisés (stabilisés en mémoire et spécifiques à chaque allographe) grâce à l'appariement d'indices sensori-

moteurs. Les scripteurs débutants réalisent des mouvements lents qui permettent de connecter en temps réel les feedbacks visuels (vision du tracé) et kinesthésiques (*i.e.*, ou proprioceptifs ; sensations du contact de l'outil sur le support). La pratique répétée du tracé renforce l'intégration visuo-motrice et, en conséquence, l'automatisation du geste graphique.

Les recherches ci-dessous décrivent des entraînements qui ciblent, soit l'un des processus (orthographiques ou moteurs), soit les deux. Les effets sont examinés sur l'écriture de mots et de lettres.

II.2.1 - Les recherches sur l'écriture de mots

Certaines études ont montré que l'expérience sensori-motrice facilite l'apprentissage et l'utilisation des associations audio-visuelles (*i.e.*, orales-écrites) en situation d'écriture. Auprès d'enfants pré-lecteurs, Labat et ses collaborateurs (2015) ont évalué la connaissance des correspondances phonographémiques dans une tâche où l'enfant devait ordonner les lettres pour « écrire » des mots. L'enfant ne devait donc pas mobiliser le geste graphique et l'acquisition du principe alphabétique était précisément testée. Un gain supplémentaire du nombre de lettres correctement choisies et agencées était observé après les entraînements visuo-haptique ou visuo-graphomoteur (comparé à l'entraînement visuel). Ces résultats en écriture confirment ceux obtenus en lecture (par ex., Gentaz *et al.*, 2003) en montrant que l'expérience sensori-motrice des lettres favorise le développement de la voie phonologique. Bosse, Chaves et Valdois (2014) ont mis en évidence que l'expérience sensori-motrice renforce aussi le développement du lexique orthographique. Les auteurs ont comparé les effets de deux apprentissages destinés à mémoriser des mots inventés sur la production écrite chez des enfants âgés de 10 ans. Les groupes différaient sur l'activité d'écriture (écrire ou épeler les mots). Le pourcentage de réponses correctes était plus élevé après l'écriture de mots qu'après l'épellation orale lettre par lettre de chaque mot.

D'autres études ont évalué la gestion simultanée de l'utilisation du principe alphabétique et des gestes graphiques grâce à une tâche d'écriture de mots. La production écrite est donc dépendante du degré d'automatisation des processus orthographiques et moteurs de l'enfant. Dans l'étude de Labat, Ecalle, Baldy et Magnan, (2014), les trajectoires développementales d'enfants faibles et bons connaisseurs de lettres sont comparées en fonction du groupe : groupe contrôle (activités qui n'impliquaient pas les lettres), groupes d'entraînement visuel, visuo-haptique ou visuo-graphomoteur (cf. description ci-dessus Labat *et al.*, 2015). Comparée au groupe contrôle, le nombre de lettres correctement écrites augmentait dans les trois groupes. De plus, les enfants faibles connaisseurs de lettres progressaient davantage grâce au surlignage de lettres (groupe visuo-graphomoteur), comparé aux groupes visuel ou visuo-haptique. L'effet de l'entraînement visuo-graphomoteur était aussi plus élevé chez les faibles connaisseurs que chez les bons connaisseurs de lettres. Dans une autre étude, des résultats identiques étaient mis en évidence six mois après le pré-test avec de jeunes enfants faibles connaisseurs de lettres, ce qui montrait un maintien dans le temps de l'effet de l'entraînement visuo-graphomoteur (Labat, Magnan & Ecalle, 2011). Ainsi, le surlignage des lettres apparaît plus efficace que le toucher actif de la forme pour apprendre à écrire. Le feedback visuel serait plus saillant lorsque l'enfant trace la lettre, ce qui faciliterait l'intégration visuo-

motrice et le développement des programmes moteurs. Enfin, Kiefer et ses collaborateurs (2015) ont comparé l'influence d'entraînements à l'écriture manuscrite ou au clavier sur l'écriture de mots avec des enfants de 4-6 ans. Avant et après l'entraînement, l'enfant devait écrire ou taper le mot en fonction de l'entraînement suivi (*i.e.*, situations apprentissage-test identiques). Les résultats indiquaient un nombre de lettres correctement écrites supérieur après la pratique de l'écriture manuscrite qu'après l'écriture au clavier. Ils suggèrent que l'intégration multimodale serait facilitée lorsque l'action est reliée à la forme de la lettre.

En résumé, l'exploration sensori-motrice de la forme des lettres favorise le développement des processus orthographiques (principe alphabétique et orthographe lexicale) et des processus moteurs.

II.2.2 - Les recherches sur l'écriture de lettres

Ces dernières années, l'utilisation des tablettes (tactile / graphique) pour étudier la production écrite s'est développée. L'un des intérêts est méthodologique car elle permet l'étude des processus, en temps réel, relatifs à l'automatisation des tracés grâce aux mesures dynamiques (vitesse, temps, crayon en l'air, longueur, pics de vélocité...). Ces mesures sont complémentaires aux mesures statiques correspondant à la qualité de la production (lisibilité, graphie correcte...). De plus, la tablette permet une présentation multimodale simultanée (Amadiou & Tricot, 2014), ce qui renforce l'intégration en mémoire des propriétés phonologiques, visuelles et sensori-motrices des lettres.

À l'heure actuelle, l'enfant est confronté à une diversification des supports (tablette, lettres en mousse, ou papier) et des outils (stylet, crayon ou doigt). La question est alors de déterminer si l'un de ces environnements est plus propice pour apprendre à écrire, mais aussi de mieux comprendre l'impact de l'interaction entre le sujet et l'environnement sur les habiletés d'écriture.

L'étude de Bara et Gentaz (2011) a montré qu'une exploration visuo-haptique de lettres en mousse améliorerait davantage la qualité globale des lettres produites, par rapport à une exploration visuelle. Des résultats similaires sur la fluence d'écriture étaient mis en évidence en faveur d'un entraînement à la motricité globale où le corps était sollicité pour apprendre la forme (*i.e.*, tracer avec le bras dans les airs, marcher sur le contours tracé au sol ; Bara & Bonneton-Boté, 2018). Vinter et Chartrel (2010) ont examiné l'impact d'un entraînement à l'intégration visuo-motrice (observation dynamique et copie de lettres sur papier) sur la copie de lettres, comparé à des entraînements visuel (observation d'un modèle dynamique) ou moteur (copie de lettres). D'un côté, l'entraînement visuel améliorerait la qualité du tracé et, d'un autre côté, l'entraînement moteur augmentait la fluidité du mouvement. L'entraînement visuo-moteur des lettres était le plus efficace pour apprendre à écrire sur une tablette, comparé aux deux autres groupes. Après de scripteurs débutants, l'effet de deux entraînements multisensoriels est comparé sur l'automatisation du tracé (Jolly, Palluel-Germain & Gentaz, 2013 ; Jolly & Gentaz, 2013). Dans la tâche de dictée de lettres, les enfants devaient écrire sur une tablette avec un stylet avant et après l'entraînement. Les deux groupes différaient sur les outils et les supports mobilisés pour apprendre l'écriture des lettres. Le groupe « tablette-stylet », entraîné avec une interface tactile était comparé au groupe

« papier-crayon ». Les résultats montraient que la fluidité du tracé s'améliorait davantage pour le groupe « tablette-styler » comparé au groupe « papier-crayon ». Palluel-Germain, Bara, Hillairet de Boisferon, Hennion, Gouagout et Gentaz (2007) ont testé l'apport d'un dispositif issu de la robotique sur la copie de lettres. L'outil « Télémaque » est constitué d'un bras où est fixé un stylo. L'enfant utilise le stylo pour tracer la lettre. Le stylo est attiré dans la direction correcte d'écriture, ce qui fournit des feedbacks visuels et kinesthésiques à l'enfant et l'aide à percevoir la cinématique chez l'expert. Comparé au groupe contrôle (copie de lettres sur papier ou ordinateur), les résultats indiquaient une amélioration de la fluence supérieure pour le groupe Télémaque (diminution de la vitesse, pics de vélocité et pauses). Plus récemment, Patchan et Puranik (2016) ont demandé à trois groupes d'enfants de moyenne section de maternelle (« papier-crayon », « tablette-doigt » ou « tablette-styler ») d'apprendre le nom et la forme de lettres grâce à leur écriture et à une description verbale des mouvements. Les performances en dictée de lettres (situation papier-crayon) étaient supérieures pour le groupe « tablette-doigt ». Le contact direct du doigt sur la feuille permet une expérience tactile enrichie et différente de celle apportée par la médiation d'un outil. En revanche, les performances des groupes « tablette-styler » et « papier-crayon » ne différaient pas significativement. L'absence de consensus entre les études sur l'apport de la tablette pourrait s'expliquer par des différences (écart) entre les contextes d'apprentissage et de test (capacités de transfert) et des programmes moteurs insuffisamment automatisés chez l'enfant. En effet, la pratique de l'écriture « papier-crayon » dans l'environnement familial et scolaire et la similitude entre les outils (styler et crayon) faciliterait le transfert de connaissances en situation d'apprentissage « tablette-styler » vers la situation de test « papier-crayon », ce qui expliquerait l'absence de différence significative entre ces deux groupes dans l'étude de Patchan et Puranik (2016). De plus, le groupe « tablette-doigt » (Patchan & Puranik, 2016) ou le groupe « Télémaque » (Palluel-Germain *et al.*, 2007) bénéficieraient de frictions plus fortes pour apprendre à tracer les lettres que les autres groupes. La qualité des indices kinesthésiques pourrait enrichir la connaissance multimodale des lettres ce qui permettrait à l'enfant de mieux contrôler ses gestes graphiques et de s'adapter aux différents environnements d'écriture. Les études ci-dessous plaident également en faveur de cette explication.

Gerth, Klassert, Dolk, Fliesser, Fischer, Nottbusch et Festman (2016) ont comparé l'impact des frictions entre les supports, tablette ou papier. Le tracé était plus dégradé sur tablette chez les plus jeunes (augmentation de la taille des lettres). Selon les auteurs, la friction du stylo sur le papier était plus forte et permettrait aux enfants d'amplifier les informations kinesthésiques indispensables au contrôle moteur. À l'inverse, les adultes parvenaient à adapter leur geste graphique pour écrire sur la surface lisse de la tablette grâce à l'activation de programmes moteurs. Mayer et ses collaborateurs (2020) ont mis en évidence des performances en écriture de mots significativement inférieures pour le groupe « styler-tablette », comparé aux groupes « papier-crayon » et « clavier-tablette ». Ce résultat pourrait indiquer des difficultés dans la maîtrise des gestes graphiques car les informations kinesthésiques seraient moins saillantes ce qui limiterait l'intégration visuo-motrice chez les scripteurs débutants. Guilbert, Alamargot et Morin (2019) ont manipulé les

feedbacks visuels (présence ou absence -main cachée derrière un écran) et proprioceptifs (supports lisse ou rugueux – film plastique sur l'écran de la tablette) et en ont évalué l'effet sur l'écriture de lettres et de mots sur tablette avec des enfants de 7-8 ans, 10-11 ans et des adultes. Comme les études précédentes, les indices proprioceptifs extraits avec la surface rugueuse facilitaient le contrôle du geste chez les jeunes scripteurs par rapport à la surface lisse. De plus, 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. Ainsi, dans l'ensemble, ces études suggèrent que l'usage de la tablette ne semble pas pertinent pour apprendre à écrire car, du fait d'une surface plus lisse que le papier, les indices kinesthésiques sont insuffisants pour construire des programmes moteurs efficaces chez les scripteurs débutants (Gerth *et al.*, 2016 ; Aparicio, Alamargot, Morin & Louis, 2019). Cependant, lorsque l'enfant peut obtenir des indices proprioceptifs en écrivant sur une tablette où l'écran est rugueux (film plastique ; Guilbert *et al.*, 2019), alors le geste graphique est mieux contrôlé.

Pour résumer, les études menées sur l'écriture de lettres démontrent que l'expérience de l'environnement (type d'expérience visuelle et sensori-motrice lié au support et à l'outil) a un effet sur le développement des processus moteurs chez les apprenants. D'autre part, le niveau d'expertise du sujet influence la maîtrise de ses gestes graphiques dans une autre situation d'écriture.

CONCLUSION : APPORT DE LA COGNITION INCARNÉE SUR L'APPRENTISSAGE DE LA LECTURE-ÉCRITURE

Cet article visait à examiner le rôle d'une exploration sensori-motrice sur l'intégration multimodale des lettres et l'apprentissage de la lecture-écriture en prenant en compte la diversité des environnements (supports et outils). Différents travaux menés en psychologie, neuropsychologie et neurosciences cognitives plaident en faveur d'une approche incarnée et située de la lecture et de l'écriture.

Cette synthèse montre que le contexte d'apprentissage (support et outil) module la qualité des connaissances multimodales en mémoire. L'émergence des connaissances dépend des interactions du sujet et de l'environnement (Varela *et al.*, 1993). Du point de vue de l'effet de l'environnement sur les apprentissages, les études manipulent le type de support (rugueux, lisse) et l'outil (stylet, crayon, doigt) et révèlent des effets différenciés. En effet, lorsque les processus moteurs ne sont pas automatisés chez le jeune enfant, l'environnement qui permet le meilleur accès aux informations visuelles ou sensori-motrices grâce à la friction de l'outil sur le support (*i.e.*, feedbacks kinesthésiques, proprioception) renforce le mieux l'apprentissage de la lecture-écriture. L'environnement peut contraindre l'action du sujet sur la forme, ce qui influence l'intégration multimodale. Certains chercheurs discutent l'impact des outils (stylet ou clavier, Mangen & Balsvik, 2016), ou plus largement de la diversité des situations du *haptic of writing* (Mangen & Velay, 2010) sur le développement de l'écriture. Les recherches montrent que l'écriture manuscrite contribue à la reconnaissance des lettres. En ce sens, il serait intéressant de comparer le développement des circuits cérébraux de la lecture dans une étude

inter-langue avec des systèmes éducatifs qui varient sur la place donnée à l'écriture manuscrite et/ou l'écriture au clavier (tablette, ordinateur). Notre synthèse met en évidence que l'action du sujet (mouvements de motricité globale ou fine) est essentielle. L'action doit être dirigée vers l'objet d'apprentissage et favoriser l'extraction de propriétés sensori-motrices distinctives et pertinentes. De plus, l'apport de l'information dynamique semble dépendre aussi des modalités sensorielles sollicitées. En effet, une exploration dynamique visuelle est moins efficace pour apprendre les lettres qu'une exploration haptique (Bara *et al.*, 2004 ; Labat *et al.*, 2015). Dès lors, il apparaît essentiel de définir la notion d'action (faire attention à / agir avec le corps ou une partie) et de la distinguer du type d'action (modalités sensorielles/ procédures exploratoires/traitement) pour en examiner les bénéfices respectifs. Dans le même sens, les comparaisons inter-groupes dans les études n'apparaissent pas toujours pertinentes car des activités différentes et/ou plusieurs types d'expérience sensori-motrice sont proposés aux enfants au sein d'un même entraînement (par ex., tracé au stylo et au doigt). Ainsi, des protocoles standardisés sont nécessaires pour mieux appréhender comment l'expérience sensori-motrice facilite les apprentissages dans les futures recherches.

Concernant l'influence du sujet sur l'environnement (Varela *et al.*, 1993), les travaux sur l'écriture montrent que le degré d'automatisation des processus moteurs a un impact sur l'adaptation du sujet au support. Les experts sont capables de transférer leurs connaissances procédurales pour tracer les lettres sur un support lisse, contrairement aux apprentis-scripteurs. Pris ensemble, ces résultats suggèrent que, pour mieux comprendre les mécanismes d'apprentissage et l'émergence des connaissances, il est nécessaire dans les futures recherches de mieux caractériser l'environnement (support, outil), le type d'action produite par les sujets, et le niveau de connaissances préalables des sujets.

Ces recherches révèlent aussi l'intérêt d'un encodage multiple en mémoire. Les traces mnésiques sont plus distinctes des autres traces en mémoire à long terme lorsque l'encodage des lettres est multimodal (Versace *et al.*, 2018). Autrement dit, la distinctivité de la trace mnésique dépend de l'intégration de multiples propriétés perceptives et motrices (Barsalou, 2008). En ce sens, une exploration bi-modale (visuo-motrice) de la forme des lettres contribue à mieux caractériser la trace qu'une exploration uni-modale (Labat *et al.*, 2017). Pour reconnaître les lettres de manière visuelle, les états cognitifs d'expériences antérieures sont recréés et l'expérience motrice facilite le rappel (Barsalou, 2008). Conceptualisé chez l'adulte, le modèle Act-In (Versace *et al.*, 2014) pourrait rendre compte de l'émergence de la connaissance d'un objet spécifique comme la lettre (Labat *et al.*, 2015 ; 2020). L'émergence dépend de la dynamique de deux mécanismes d'activation. La perception d'une lettre réactive toutes les traces mnésiques qui incluent les mêmes propriétés perceptives (diffusion inter-trace). En même temps, l'activation d'une propriété de la trace (par ex., visuelle) active toutes les autres propriétés de cette trace unifiée (par ex., motrice, auditive...), perceptivement présentes ou non (diffusion intra-trace). En ce sens, les données comportementales indiquent que l'ajout d'une expérience sensori-motrice de la forme des lettres (kinesthésique,

proprioceptive) à un apprentissage classique audio-visuel favorise l'intégration et l'activation audio-visuelle (les relations grapho-phonémiques) pour lire et orthographier les mots (par ex., Gentaz *et al.*, 2003 ; Labat *et al.*, 2015 ; Bosse *et al.*, 2014). Pendant le rappel, les données comportementales et en neuro-imagerie révèlent que les processus moteurs contribuent à l'activation audio-visuelle (par ex., Longcamp *et al.*, 2008). Le degré d'automatisation du geste semble également influencer l'intégration et l'activation audio-visuelle (Mayer *et al.*, 2020). L'article récent de Seyll, Wyckmans et Content (2020) propose une explication alternative aux effets de supériorité de l'écriture manuscrite basée sur une approche non incarnée de la cognition. Les scores en reconnaissance visuelle de symboles étaient plus élevés après l'écriture manuscrite et la méthode par composition (*i.e.*, agencer des traits pour former le symbole) qu'après l'écriture au clavier. Les effets obtenus ne s'expliquaient pas par le nombre d'exploration ou par le temps consacré à l'apprentissage. Ils suggèrent que ce serait l'analyse visuelle détaillée de l'écriture manuscrite qui influencerait la reconnaissance visuelle, plutôt que l'activation des programmes moteurs. Des recherches complémentaires seraient nécessaires pour mieux comprendre ces résultats divergents. De plus, cette synthèse montre aussi que l'expérience sensori-motrice de la forme favorise aussi l'intégration visuo-motrice des lettres, ce qui permet au geste graphique d'être plus automatisé. D'autres études ont également montré l'intérêt d'un encodage multiple des lettres où l'information dynamique sur le tracé des lettres était codée grâce au feedback auditif (Danna & Velay, 2017). En vue d'évaluer et de réduire le geste graphique chez des personnes avec dysgraphie, ce feedback consistait à guider les sujets dans leurs tracés grâce à des informations sonores sur la cinématique du mouvement (dimension spatio-temporelle). Dans ce dispositif de "sonification de l'écriture", l'expérience du son était un canal d'informations supplémentaires à la vision et à la proprioception et améliorait la fluidité du tracé.

Néanmoins, du point de vue du modèle Act-In (Versace *et al.*, 2014), il reste encore à préciser dans ces études sur l'apprentissage des lettres l'apport respectif des mécanismes d'activation intra-trace et inter-trace. De plus, dans ce modèle, l'activation dépend de la distinctivité de la trace et du niveau d'intégration (*binding*) des propriétés. L'expérience sensori-motrice faciliterait l'intégration multimodale (Fredembach *et al.*, 2009). Cette synthèse montre toute la difficulté d'étudier séparément les mécanismes mnésiques (intégration) et perceptifs (activation) car l'évaluation des mécanismes perceptifs reflète à la fois l'intégration et l'activation d'une connaissance. Par ailleurs, il serait intéressant de considérer le modèle Act-In (Versace *et al.*, 2014) et, plus généralement, la cognition incarnée dans une perspective développementale. En effet, toute action ne conduit pas à un apprentissage efficient (Bara & Tricot, 2017). Le niveau d'automatisation des processus aurait un impact sur l'apport d'un apprentissage multimodal. Chez l'adulte, une présentation multiple pourrait desservir l'apprentissage alors que ce serait une plus-value chez l'enfant (voir Bara & Tricot, 2017 pour une analyse du point de vue de la théorie de la charge mentale). L'une des raisons de l'apport d'un apprentissage multimodal serait que le coût cognitif des traitements serait divisé entre les sous-systèmes (visuel, auditif et moteur) de la mémoire de travail chez l'apprenant, ce qui réduirait la charge cognitive (Chandler & Tricot, 2015).

Dans l'ensemble, le mouvement doit surtout être pertinent pour l'apprentissage cible. À l'inverse, les experts auraient des connaissances préalables sur lesquelles ils prennent appui. Le guidage de l'apprentissage par une présentation multimodale pourrait alors être redondant (surcharge cognitive) plutôt que complémentaire. Ainsi, l'utilisation du corps contribuerait à un apprentissage « nouveau » alors que le geste pourrait être simplement simulé en mémoire lorsque le sujet aurait des connaissances préalables dans le domaine (geste intériorisé). Cette hypothèse développementale mériterait d'être testée dans le cadre de l'apprentissage incarné de la lecture-écriture. L'explicitation des stratégies mobilisées pendant l'apprentissage par le sujet pourrait déjà fournir des éléments de réponse.

Les recherches présentées dans cette synthèse questionnent plus largement l'articulation entre les modèles classiques computo-symboliques ou connexionnistes, rendant compte de l'apprentissage spécifique de la lecture-écriture, et l'approche plus large d'une cognition incarnée (voir Bara & Tricot, 2017 pour une discussion). De notre point de vue, la réflexion devrait aussi portée sur l'intégration de la composante motrice dans des modèles de reconnaissance de mots où sont connectés seulement l'orthographe (visuel) et la phonologie (auditif). Cela nécessiterait probablement de proposer un modèle plus intégratif relié au développement du geste graphique. De plus, le module de traitement pré-lexical de l'identité abstraite des lettres pourrait formaliser davantage la place de la motricité dans la reconnaissance des lettres.

Pour conclure, les recherches soulignent l'apport d'un encodage multimodal des lettres en mémoire sur l'émergence de connaissances incarnées chez l'apprenant. Les études présentées montrent un effet différencié sur la connaissance des lettres et la lecture-écriture en fonction du contexte d'apprentissage, notamment l'environnement (supports et outils), le type d'action produite par les sujets, et le niveau de connaissances préalables des sujets. Le rôle positif de l'expérience sensori-motrice sur l'intégration multimodale des lettres et l'apprentissage de la lecture-écriture devrait amener la communauté scientifique à reconsidérer la nature symbolique de la cognition, en intégrant l'existence de connaissances modales (Ionescu & Vasc, 2014). Enfin, de tels résultats peuvent fournir des pistes aux professionnels de l'éducation dans le but de promouvoir des pratiques pédagogiques efficaces basées sur un apprentissage incarné.

RÉFÉRENCES

- Amadiou, F. & Tricot, A. (2014). Apprendre avec le numérique : mythes et réalités. Paris, Retz.
- Aparicio, X., Alamargot, D., Morin, M. & Louis, J. (2019). Intérêts et limites des outils numériques pour l'apprentissage de la production écrite. *A.N.A.E.* 163, 769-774.
- Bara, F. & Bonneton-Botté, N. (2018). Learning letters with the whole body: Visuomotor versus visual teaching in kindergarten. *Perceptual and motor skills*, 125, 1, 190-207.
- Bara, F., Fredembach, B. & Gentaz, É. (2010). Rôle des procédures exploratoires manuelles dans la perception haptique et visuelle de formes chez des enfants scolarisés en cycle 2. *L'Année Psychologique*, 110, 2, 197-225.
- Bara, F. & Gentaz, E. (2011). Haptics in teaching handwriting: The role of perceptual and visuo-motor skills. *Human Movement Science*, 30, 4, 745-759.

- Bara, F., Gentaz, E. & Colé, P. (2007). Haptics in learning to read with children from low socio-economic status families. *British Journal of Developmental Psychology*, 25, 4, 643-663.
- Bara, F. & Tricot, A. (2017). Le rôle du corps dans les apprentissages symboliques: Apports des théories de la cognition incarnée et de la charge cognitive. *Recherches sur la philosophie et le langage*, 33, 219-249.
- Barsalou, L.W. (2008). Grounded cognition. *Annual Review of Psychology* 59, 617-645.
- Bartolomeo, P., Bachoud-Lévi, A.C., Chokron, S. & Degos, J.D. (2002). Visually and motor-based knowledge of letters: Evidence from a pure alexic patient. *Neuropsychologia*, 40, 8, 1363-1371.
- Berninger, V.W. & Swanson, H.L., 1994. Modifying Hayes and Flower's model of skilled writing to explain beginning and developing writing. In J.S Carlson & E.C. Butterfly (Eds.), *Advances in Cognition and Educational Practice*. Vol. 2: *Children's Writing: Toward a Process Theory of the Development of Skilled Writing* (pp. 57-81). Greenwich, CT, J.A.I. Press.
- Bosse, M.L., Chaves, N. & Valdois, S. (2014). Lexical orthography acquisition: Is handwriting better than spelling aloud?. *Frontiers in psychology*, 5, 56.
- Brunel, L., Labeye, E., Lesourd, M. & Versace, R. (2009). The sensory nature of episodic memory: Sensory priming effects due to memory trace activation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 35(4), 1081-1088.
- Chandler, P. & Tricot, A. (2015). Mind your body: the essential role of body movements in children's learning. *Educational Psychology Research*, 27, 365-370.
- Coltheart, M., Curtis, B., Atkins, P. & Haller, M. (1993). Models of reading aloud: Dual-route and parallel-distributed processing approaches. *Psychological Review*, 100, 4, 589-608.
- Danna, J. & Velay, J.L. (2017). Handwriting Movement Sonification: Why and How?. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 47, 2, 299-303.
- Déjerine, J. (1892). Contribution à l'étude anatomo-pathologique et clinique des différentes variétés de cécité verbale. *Mémoires de la Société de Biologie*, 4, 61-90.
- Foulin, J.N. (2005). Why is letter-name knowledge such a good predictor of learning to read? *Reading and Writing* 18, 129-155.
- Fredembach, B., de Boisferon, A.H. & Gentaz, E. (2009). Learning of arbitrary association between visual and auditory novel stimuli in adults: the "bond effect" of haptic exploration. *PLoS one*, 4, 3, e4844.
- Gentaz, E. (2009). *La main, le cerveau et le toucher*. Paris, Dunod.
- Gentaz, E., Colé, P. & Bara, F. (2003). Évaluation d'entraînements multi-sensoriels de préparation à la lecture pour les enfants en grande section de maternelle: une étude sur la contribution du système haptique manuel. *L'Année Psychologique*, 103, 4, 561-584.
- Gerth, S., Klassert, A., Dolk, T., Fliesser, M., Fischer, M.H., Nottbusch, G. & Festman, J. (2016). Is handwriting performance affected by the writing surface? Comparing preschoolers', second graders', and adults' writing performance on a tablet vs. paper. *Frontiers in psychology*, 7, 1308.
- Gough, P.B. & Tunmer, W.E. (1986). Decoding, reading, and reading disability. *Remedial and Special Education*, 7, 1, 6-10.
- 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.
- Ionescu, T. & Vasc, D. (2014). Embodied cognition: challenges for psychology and education. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 128, 275-280.
- James, K.H. & Engelhardt, L. (2012). The effects of handwriting experience on functional brain development in pre-literate children. *Trends in Neuroscience and Education*, 1, 1, 32-42.

- James, K.H. & Gauthier, I. (2006). Letter processing automatically recruits a sensory-motor brain network *Neuropsychologia*, 44, 14, 2937-2949.
- Jolly, C. & 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, 495-512.
- Jolly, C., Palluel-Germain, R. & Gentaz, E. (2013). Evaluation of a tactile training for handwriting acquisition in French kindergarten children: A pilot study. In H. Schwitzer & D. Foulke (Eds.), *Kindergartens: Teaching Methods, Expectations and Current Challenges* (pp. 161-176). Hauppauge, USA, Nova Science.
- Kandel, S. & Perret, C. (2015). How does the interaction between spelling and motor processes build up during writing acquisition?. *Cognition*, 136, 325-336.
- Kiefer, M., Schuler, S., Mayer, C., Trumpp, N.M., Hille, K., & Sachs, S. (2015). Handwriting or Typewriting? The Influence of Pen or Keyboard-Based Writing Training on Reading and Writing Performance in Preschool Children. *Advances in Cognitive Psychology*, 11, 4, 136-146.
- Labat, H., Boisson, A., Brunel, L., Ecalle, J., Versace, R. & Magnan, A. (2020). Multisensory letter integration and implicit learning of reading in 5-year-old children. *European Review of Applied Psychology*, 70, 1, 100477.
- Labat, H., Ecalle, J., Baldy, R. & Magnan, A. (2014). How can low-skilled 5-year-old children benefit from multisensory training on the acquisition of the alphabetic principle? *Learning and Individual Differences*, 29, 106-113.
- Labat, H., Magnan, A. & Ecalle, J. (2011). Effet d'une exploration « multisensorielle séquentielle orientée » sur le développement de la compréhension du principe alphabétique chez les enfants de 5 ans faibles connaisseurs de lettres. *L'Année Psychologique*, 111, 4, 641-671.
- Labat, H., Ecalle, J. & Magnan, A. (2017). L'apprentissage de la lecture-écriture. In R. Miljkovitch, F. Morange-Majoux & E. Sander (Eds). *Traité de Psychologie du développement* (pp. 227-235). Issy-les-Moulineaux, Elsevier-Masson.
- Labat, H., Vallet, G., Magnan, A. & Ecalle, J. (2015). Facilitating effect of multisensory letter encoding on reading and spelling in 5-year-old children. *Applied Cognitive Psychology*, 29, 3, 381-391.
- Lillard, Angeline S., Heise, M.J., Richey, E.M., Tong, X., Hart, A. & Bray, P.M. (2017). Montessori Preschool Elevates and Equalizes Child Outcomes: A Longitudinal Study. *Frontiers in Psychology*, 8.
- Longcamp, M., Boucard, C., Gilhodes, J.C., Anton, J.-L., Roth, M., Nazarian, B. & Velay, J.-L. (2008). Learning through hand- or type-writing influences visual recognition of new graphic shapes: Behavioral and functional imaging evidence. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20, 5, 802-825.
- Longcamp, M., Lagarrigue, A. & Velay, J.L. (2010). Contribution de la motricité graphique à la reconnaissance visuelle des lettres. *Psychologie française*, 55, 2, 181-194.
- Longcamp, M., Zerbato-Poudou, M.T. & Velay, J. -L. (2005). The influence of writing practice on letter recognition in preschool children: A comparison between handwriting and typing. *Acta Psychologica*, 119, 1, 67-79.
- Magnan, A. & Ecalle, J. (2018). L'apprentissage de la lecture: des processus d'identification de mots écrits à la compréhension. In R. Baldy (Ed.), *Dessiner, lire, écrire et calculer : un regard neuf* (pp. 93-172). Paris, In Press.
- Mangen, A. & Balsvik, L. (2016). Pen or keyboard in beginning writing instruction? Some perspectives from embodied cognition. *Trends in Neuroscience and Education*, 5, 3, 99-106.
- Mangen, A. & Velay, J. L. (2010). Digitizing literacy: Reflections on the haptics of writing. *Advances in haptics*, 1, 3, 86-40.

- Mayer, C., Wallner, S. Budde-Spengler, N., Arndt, P.A., Braunert, S. Arndt, P.A. & Kiefer, M. (2020). Literacy Training of Kindergarten Children With Pencil, Keyboard or Tablet Stylus: The Influence of the Writing Tool on Reading and Writing Performance at the Letter and Word Level. *Frontiers in Psychology*, 10:3054. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.03054>
- Montessori, M. (1915). *The Montessori method*. London, Heinemann.
- Palluel-Germain, R., Bara, F., Hillairet de Boisferon, A., Hennion, B., Gouagour, P. & Gentaz, E. (2007, March). A visuo-haptic device - Telemaque - increases kindergarten children's handwriting acquisition. In *Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WHC'07)* (pp. 72-77), IEEE.
- Patchan, M.M. & Puranik, C.S. (2016). Using tablet computers to teach preschool children to write letters: Exploring the impact of extrinsic and intrinsic feedback. *Computers & education*, 102, 128-137.
- Perfetti, C.A. & Tan, L.H. (2013). Write to read: the brain's universal reading and writing network. *Trends in cognitive sciences*, 17, 2, 56-57.
- Perruchet, P. & Vinter, A. (2002). The self-organizing consciousness. *Behavioral and Brain Sciences*, 25, 297-388.
- Perry, C., Ziegler, J.C. & Zorzi, M. (2007). Nested incremental modeling in the development of computational theories: the CDP+ model of reading aloud. *Psychological review*, 114, 2, 273.
- Ruiter, M., Loyens, S. & Paas, F. (2015). Watch your step children! Learning two-digit numbers through mirror-based observation of self-initiated body movements. *Educational Psychology Review*, 27, 3, 457-474.
- Schubert, T., Reilhac, C. & McCloskey, M. (2018). Knowledge about writing influences reading: Dynamic visual information about letter production facilitates letter identification. *Cortex*, 103, 302-315.
- Seki, K., Yajima, M. & Sugishita, M., 1995. The efficacy of kinesthetic reading treatment for pure alexia. *Neuropsychologia*, 33, 5, 595-609.
- Seyll, L., Wyckmans, F. & Content, A. (2020). The impact of graphic motor programs and detailed visual analysis on letter-like shape recognition. *Cognition*, 205, 104443.
- Share, D.L. (1999). Phonological recoding and orthographic learning: A direct test of the self-teaching hypothesis. *Journal of Experimental Child Psychology*, 72, 2, 95-129.
- Varela, F.J., Thompson, E. & Rosch, E. (1991). *The Embodied Mind: Cognitive Science and Human Experience*. Cambridge, MA, MIT Press.
- Versace, R., Brouillet, D. & Vallet, G. (2018). *Cognition incarnée: Une cognition située et projetée*. Bruxelles, Mardaga.
- Versace, R., Vallet, G.T., Riou, B., Lesourd, M., Labeye, E., & Brunel, L. (2014). Act-In: An integrated view of memory mechanisms. *Journal of Cognitive Psychology*, 26, 3, 280-306.
- Vinter, A. & Chartrel, E. (2010). Effects of different types of learning on handwriting movements in young children. *Learning and Instruction*, 20, 6, 476-486.
- Wilson, M. (2002). Six views of embodied cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9, 4, 625-636.
- Zwaan, R.A., Madden, C.J., Yaxley, R.H. & Aveyard, M.E. (2004). Moving words: Dynamic representations in language comprehension. *Cognitive Science*, 28, 4, 611-619.