

APPORTS DE LA MODALITE HAPTIQUE MANUELLE DANS LES APPRENTISSAGES SCOLAIRES (LECTURE, ECRITURE ET GEOMETRIE)

Edouard GENTAZ, Florence BARA, Richard PALLUEL-GERMAIN,
Laetitia PINET et Anne HILLAIRET DE BOISFERON

CNRS, Laboratoire « Psychologie et NeuroCognition », UMR 5105,
Université Pierre Mendès France de Grenoble, France
Mél : Edouard.Gentaz@upmf-grenoble.fr

Résumé

L'objectif de cet article est de montrer que l'ajout de la modalité haptique manuelle dans des entraînements classiques destinés à la préparation aux premiers apprentissages scolaires chez les enfants scolarisés en grande section de maternelle améliore leur efficacité. Nous décrirons tout d'abord les trois principales caractéristiques fonctionnelles de la modalité haptique manuelle qui sont susceptibles de favoriser les apprentissages, à savoir une bonne identification haptique des objets, une perception haptique analytique et une perception haptique non dominée par la vision. Ensuite, nous examinons les principales recherches qui révèlent les effets bénéfiques de l'ajout de la modalité haptique dans les entraînements classiques destinés à la préparation des apprentissages comme la lecture, l'écriture et la géométrie chez les enfants de 5 ans.

Abstract

THE ADVANTAGES OF THE MANUAL HAPTIC MODALITY IN SCHOOL-BASED LEARNING (READING, WRITING AND GEOMETRY)

The goal of this article is to demonstrate that the efficiency of classic training designed as preparation for the first types of school-based learning among kindergarten children is improved by the addition of the manual haptic modality. We first describe the three principal functional characteristics of the manual haptic modality that are likely to aid learning: good haptic identification of objects, analytic haptic perception, and haptic perception undominated by vision. We then examine the principal research demonstrating the benefits of the addition of the haptic modality in classic training designed to prepare for the learning of subjects such as reading, writing and geography by 5-year old children.

Resumen

APORTES DE LA MODALIDAD HAPTICA MANUAL EN LOS APRENDIZAJES ESCOLARES (LECTURA, ESCRITURA Y GEOMETRIA)

El objetivo de este artículo es demostrar que añadiendo la modalidad háptica manual en los entrenamientos clásicos de preparación a los aprendizajes escolares para niños en última sección del parvulario, se mejora su eficacia. Describimos primero las tres principales

características funcionales de la modalidad háptica manual susceptibles de fomentar los aprendizajes, es decir una buena identificación háptica de los objetos, una percepción háptica analítica y una percepción háptica no dominada por la visión. Luego, examinamos las principales investigaciones que hacen salir a la luz los efectos beneficiosos al añadir la modalidad háptica en los entrenamientos clásicos de preparación a los aprendizajes como la lectura, la escritura y la geometría con los niños de 5 años.

Resumo

BENEFÍCIOS DA MODALIDADE HÁPTICA MANUAL NO APRENDIZADO ESCOLAR (LEITURA, ESCRITA E GEOMETRIA)

O objetivo deste artigo é de mostrar que o acréscimo da modalidade háptica manual nos exercícios clássicos destinados à preparação dos primeiros aprendizados escolares nas crianças do terceiro ano de escola maternal melhoram a sua eficácia. Nós descreveremos inicialmente as três principais características funcionais da modalidade háptica manual que podem favorecer o aprendizado, ou seja uma boa identificação háptica dos objetos, uma percepção háptica analítica e uma percepção háptica não dominada pela visão. Em seguida, nos examinamos os principais estudos sobre os exercícios clássicos destinados ao aprendizado da leitura, da escrita e da geometria nas crianças de 5 anos.

Riassunto

CONTRIBUTO DELLA MODALITÀ APtica MANUALE NELL'APPRENDIMENTO SCOLARE DI MATERIE QUALI LA LETTURA, LA SCRITTURA E LA GEOMETRIA.

L'obiettivo di questo articolo è di mostrare che l'introduzione della modalità aptica manuale migliora l'efficacità dell'insegnamento classico destinato alla preparazione dei primi apprendimenti scolastici negli studenti di scuola elementare. Descriveremo inizialmente le tre principali caratteristiche funzionali della modalità aptica manuale che favoriscono l'apprendimento: il riconoscimento al tatto degli oggetti, la percezione aptica analitica e la percezione aptica non influenzata dalla vista. In seguito, esamineremo le principali ricerche che mostrano gli effetti benefici dell'introduzione della modalità aptica nell'insegnamento classico destinato alla preparazione dell'apprendimento di materie quali la lettura, la scrittura e la geometria per bambini di 5 anni.

Une grande partie des apprentissages scolaires fondamentaux mobilisent seulement les modalités sensorielles visuelle et auditive des jeunes enfants. L'objectif de cet article est de montrer que l'ajout de la modalit  haptique manuelle dans des entraînements scolaires classiques peut améliorer leur efficacit  (Gentaz, 2009). Il est classique de distinguer deux types de perception tactile manuelle (Hatwell *et al.*, 2000, 2003) : la perception cutan e et la perception haptique. La perception cutan e ou passive résulte de la stimulation d'une partie de la peau alors que le segment corporel qui la porte est totalement immobile. Dans ce cas, comme seule la couche superficielle de la peau est soumise à des déformations mécaniques, le traitement perceptif ne concerne que les informations cutan es li es au stimulus appliqué sur la main. Ce type de perception n'impliquant pas de mouvements d'exploration ne sera pas abordé ici. La perception haptique (terme introduit en psychologie par Revesz en 1934) résulte de la stimulation de la peau provenant des mouvements actifs d'exploration de la main entrant en contact avec des objets. C'est ce qui se produit quand, par exemple, la main et les doigts suivent le contour d'un objet pour en

apprécier la forme. Dans ce cas, il s'ajoute nécessairement à la déformation mécanique de la peau celle des muscles, des articulations et des tendons qui résultent des mouvements d'exploration. Des processus très complexes sont impliqués car ils doivent intégrer simultanément les informations cutanées et les informations proprioceptives et motrices liées aux mouvements d'exploration pour former un ensemble indissociable appelé perceptions haptiques. Dans un premier temps, nous allons présenter les principales caractéristiques fonctionnelles de la modalité haptique manuelle qui sont susceptibles de favoriser les apprentissages scolaires. Dans un second temps, nous décrirons les principales recherches qui révèlent les effets bénéfiques de l'ajout de la modalité haptique dans des apprentissages scolaires comme la lecture, l'écriture et la géométrie.

1. Les caractéristiques fonctionnelles de la modalité haptique manuelle chez les jeunes enfants

Pour compenser l'exiguïté du champ perceptif cutané (limité à la zone de contact avec les objets) et appréhender les objets dans leur intégralité, il faut produire des mouvements d'exploration volontaires, variant en fonction des caractéristiques de ce qu'il faut percevoir. La perception du stimulus va donc dépendre de la façon dont il est exploré. Il en résulte une appréhension morcelée, plus ou moins cohérente, parfois partielle et toujours très séquentielle, qui charge lourdement la mémoire de travail et qui nécessite, en fin d'exploration, un travail mental d'intégration et de synthèse pour aboutir à une représentation unifiée de l'objet.

De nombreuses études ont d'ailleurs montré que les caractéristiques des mouvements d'exploration ont une importance capitale sur les perceptions. Lederman et Klatzky (1987) ont identifié, chez les adultes qui devaient classer des objets en fonction d'un critère donné, des « procédures exploratoires » (PE), c'est-à-dire des ensembles spécifiques de mouvements qui se caractérisent par la quantité d'information qu'ils peuvent apporter et donc par l'éventail des propriétés auxquelles ils sont adaptés. Certaines procédures sont très spécialisées, d'autres plus générales. Ainsi, le Frottement latéral est adapté seulement à la texture, le Soulèvement au poids, la Pression à la dureté du matériau. Le Contact statique informe principalement sur la température et, plus approximativement, sur la forme, la taille, la texture et la dureté. L'Enveloppement donne aussi des informations globales sur ces propriétés, tandis que le Suivi des contours donne une connaissance précise de la forme et de la taille, et une connaissance plus floue de la texture et de la dureté. Ces différentes procédures sont soit nécessaires (obligatoires pour une propriété), soit suffisantes, et certaines sont optimales, c'est-à-dire ont une efficacité maximale pour une propriété. Ainsi, le Frottement latéral est optimal pour la texture, tandis que le Soulèvement est nécessaire et optimal pour le poids.

Lederman et Klatzky (1993) ont observé une stratégie d'exploration en deux temps: d'abord sont produites des procédures non spécialisées, mobilisant toute la main et apportant des informations peu précises sur plusieurs propriétés, ce qui donne une connaissance globale de l'ensemble. Puis les procédures spécifiques sont mises en œuvre. Par exemple, pour la forme, les adultes commencent par l'Enveloppement, puis passent au Suivi des Contours.

Chez l'enfant, la perception haptique est non seulement tributaire du développement des organes sensoriels et moteurs impliqués dans l'exploration, mais également des capacités de mémoire de travail. En effet, cette capacité de mémoire est importante

car il faut conserver les données apportées successivement par la main puis les intégrer en un tout unifié. Les caractéristiques de la perception haptique des enfants de 5 ans se distinguent sur un certain nombre de points de celles des adultes et des enfants plus jeunes et plus âgés. Voyons maintenant en détail les trois principales caractéristiques fonctionnelles de la modalité haptique chez les jeunes enfants.

1.1. Une identification haptique efficace des objets multidimensionnels

Bien que l'exploration haptique chez les jeunes enfants soit encore partielle et peu active et que les procédures d'exploration soient en général peu adaptées à la tâche, c'est vers 5-6 ans, selon les observations de Piaget et Inhelder (1947), que l'exploration haptique des formes géométriques devient systématique et organisée. La modalité haptique est utilisée aussi bien dans sa fonction motrice (de transport et de transformation des objets) que dans sa fonction perceptive. Bigelow (1991) ont montré que les enfants de 5 ans parviennent quasiment systématiquement à identifier des objets usuels (cuillère, balle, clés...). Plus récemment, Bushnell et Baxt (1999) ont examiné une étude chez des enfants de 5 ans qui avaient pour tâche d'explorer haptiquement ou visuellement des objets familiers et non familiers puis de les reconnaître soit dans la même modalité soit dans une modalité différente. Les résultats révèlent que les reconnaissances haptique et visuelle des objets familiers et non familiers sont quasiment parfaites. La reconnaissance en intermodal pour les objets familiers est également très bonne, par contre elle est moins précise pour les objets non familiers. Ils concluent que les enfants de 5 ans sont capables de former des représentations perceptives des objets suffisamment distinctes en mémoire pour permettre une reconnaissance et une discrimination précise. Ils sont capables d'encoder l'information recueillie par le toucher et de la retenir. Il est cependant à noter que ces études utilisent des objets qui se différencient sur plusieurs dimensions (forme, texture, taille, poids, etc.). Dans les recherches qui étudient la perception haptique et les capacités de transfert intermodal pour des objets qui se différencient uniquement sur une seule dimension (par exemple les contours), les résultats sont différents. Ces études montrent des déficits dans les performances de reconnaissance haptique et intermodale en comparaison des performances en reconnaissance visuelle (cf. Hatwell, 1986). Dans ce sens également, Klatzky, Lederman, et Reed (1989) trouvent que les objets qui diffèrent entre eux sur plusieurs dimensions sont classés plus rapidement que ceux qui diffèrent par une seule dimension (surtout si cette dimension est la forme). Ainsi, les objets multidimensionnels seraient plus facilement perçus et discriminés par la modalité haptique que les objets différents sur une seule dimension. Cette différence dans le matériel utilisé expliquerait que les résultats soient différents d'une étude à l'autre concernant les capacités de transfert intermodal chez les jeunes enfants. En utilisant des formes se différenciant seulement par les contours, la perception haptique est désavantagée puisqu'elle est moins performante que la perception visuelle pour le traitement des informations spatiales.

1.2. Une perception haptique analytique

Les objets étant multidimensionnels, ils ont une valeur sur plusieurs dimensions: texture, localisation, orientation, taille, forme, etc. Dans le cadre de la vision, toutes les dimensions sont perçues quasi simultanément (à quelques millisecondes près), d'un seul coup d'œil. Ceci n'est pas le cas dans la modalité haptique en raison du mode d'exploration et des incompatibilités motrices rendant la perception très séquentielle. C'est pourquoi cette perception semble moins « globale » et plus

« analytique » que la perception visuelle (Revesz, 1950). Des travaux plus récents permettent de mieux comprendre cette différence.

Leur point de départ se trouve chez Garner (1974) qui, pour la modalité visuelle, distingue les dimensions « intégrées » et « séparées ». Les premières sont perçues globalement, c'est-à-dire ne sont pas dissociées les unes des autres : c'est le cas par exemple pour la teinte, la saturation et la brillance, qui sont constitutives de la couleur. Toute modification de la saturation (quantité de couleur pure) change notre perception de la teinte (longueur d'onde) et de la brillance (quantité de lumière réfléchie). Au contraire, les dimensions « séparées » sont dissociables et indépendantes. Ainsi, chez les adultes, un changement de taille n'affecte pas la perception de la forme, et inversement. Pour connaître le caractère intégré ou séparé des dimensions, Garner utilise notamment une tâche de classification rapide selon un critère imposé.

Dans cette méthode dite de classification rapide imposée, Garner utilise 4 objets qui prennent 2 valeurs sur 2 dimensions. Le sujet doit classer le plus vite possible chaque objet selon un critère (taille, couleur, etc.) donné par l'expérimentateur. Une seule dimension doit donc être prise en considération, et l'autre ignorée. Dans une condition Contrôle, une seule dimension varie (par exemple, la taille) et l'autre est constante (la couleur). Dans une condition Corrélée, la dimension pertinente est corrélée avec la dimension non pertinente. Ainsi, pour un classement par la taille, les objets petits sont tous rouges et les objets grands sont tous bleus. Si les dimensions de taille et couleur sont séparées, la couleur sera ignorée et les performances (réponses correctes et temps de réponses TR) ne seront pas différentes de celles de la condition Contrôle, où la couleur ne varie pas. Mais s'il y a un « gain de redondance », c'est-à-dire une facilitation dans la condition Corrélée, c'est que les deux dimensions ont été traitées et n'ont donc pas été dissociées (dimensions intégrées). Enfin, dans une condition Orthogonale, les deux dimensions varient indépendamment: les objets, petits ou grands, sont rouges ou bleus (utilisation des 4 objets). Si le filtrage est réussi (dimensions séparées), les performances dans cette condition seront analogues à celles du Contrôle. Si au contraire il y a des interférences (augmentation des TR et des erreurs), c'est que la dimension non pertinente a été traitée (dimensions intégrées) et a provoqué une gêne. On a observé ainsi que, dans la vision, le caractère séparé ou intégré des dimensions dépend de l'âge : les jeunes enfants de 4-6 ans ont tendance à traiter les propriétés de façon globale (dominance des classements par similarité globale tenant compte des deux dimensions) alors que les plus âgés et les adultes les traitent de façon séparée (dominance des classements dimensionnels ne tenant compte que d'une seule propriété et ignorant l'autre) (Smith, 1989).

Ces méthodes ont été reprises et appliquées à la modalité haptique. La question était de savoir si, en raison du caractère séquentiel de l'appréhension tactile, la séparation et/ou l'intégration des dimensions s'effectuaient selon les mêmes lois que la vision. En haptique, l'effet de l'âge apparaît moins marqué qu'en visuel car, même à 5 ans, les classements par similarité globale sont moins fréquents que les classements dimensionnels (Berger et Hatwell, 1993, 1995, 1996). Chez les adultes, Reed, Lederman, et Klatzky (1990) ont étudié l'intégration des propriétés de taille, forme, texture et dureté avec du matériel bi-dimensionnel et des tâches de classifications rapides imposées. Les deux premières propriétés sont spatiales, les dernières sont matérielles. Un gain de redondance est observé avec la taille et la forme, de même qu'avec la texture et la dureté, mais l'effet est moins net avec les combinaisons taille-texture et taille-dureté. Pour les auteurs, ceci s'explique par les

procédures exploratoires. En effet, les procédures optimales pour la texture et la dureté sont incompatibles avec celles adaptées à la taille, alors que celles propres aux deux propriétés matérielles sont suffisantes pour apporter l'information recherchée. L'importance des procédures exploratoires a été démontrée par Reed (1994). Elle a utilisé soit des formes tridimensionnelles curvilignes (sans arêtes) dans lesquelles le frottement latéral sur la surface informe aussi sur la forme, soit des formes bi-dimensionnelles comportant des arêtes et des surfaces, dans lesquelles les procédures relatives à la forme et la texture sont incompatibles. Un gain de redondance est observé avec les formes 3D mais aussi (ce qui n'était pas prévu) avec les formes 2D, ce qui montre qu'une information conjointe, même partielle, conduit à l'intégration des propriétés haptiques.

1.3. Une perception haptique non « capturée » par la vision

Le caractère spécialisé des procédures d'exploration manuelle décrites plus haut a des conséquences sur le traitement des propriétés de l'objet. Freides (1974), Hatwell (1986), Pick et Pick (1966) et Pick (1974) ont défendu l'idée d'une spécialisation fonctionnelle des modalités sensorielles: chaque modalité excelle dans le traitement de certaines propriétés et est moins performante dans d'autres. Ainsi, la modalité haptique est très performante dans la perception de la texture et la dureté des matériaux, alors qu'elle l'est moins dans celle de l'espace. Lederman et Klatzky (1993) ont développé cette idée et ont montré qu'en raison de son mode d'exploration, le toucher n'est pas spécialisé dans la perception spatiale, domaine d'excellence de la vision, mais l'est plutôt dans les propriétés matérielles. Cette spécialisation s'explique sans doute par la simplicité des procédures exploratoires optimales pour percevoir la texture ou la dureté, alors que celles propres aux propriétés géométriques exigent des mouvements coordonnés dans le temps.

Dans les situations de fonctionnement bisensoriel, les deux modalités appréhendent en même temps un objet et se coordonnent pour le percevoir de façon cohérente. Les recherches chez l'adulte montrent que lorsque le test est visuel, pour les aspects spatiaux, l'exploration bi-modale n'est pas différente de l'exploration unimodale visuelle, ce qui souligne le rôle facilitateur de la vision dans l'analyse des propriétés spatiales des objets. Par contre, pour un test en haptique, la présentation bi-modale améliore la reconnaissance (Walsh, 1973). Comme la perception visuelle est plus riche et plus économique, l'exploration haptique ne serait pas mise spontanément en œuvre et n'apporterait pas d'informations supplémentaires. Lors de conflits perceptifs, la vision est dominante pour le traitement spatial et les informations haptiques ne sont utilisées que dans le cas d'une rupture forte de la cohérence intermodale (Power et Graham, 1976). Bien que ce modèle de dominance visuelle soit nuancé par les résultats de recherches récentes (Ernst et Banks, 2002), il semble néanmoins que chez l'adulte, les informations visuelles aient un poids beaucoup plus important que les informations haptiques pour le traitement des propriétés géométriques des objets.

Chez les jeunes enfants, la question de la dominance de la vision sur le toucher a été envisagée dans le cas d'une perception visuelle ambiguë comme par exemple la perception des lettres en miroir, pour lesquelles la distinction se fait uniquement à partir d'une inversion gauche/droite. Il est intéressant d'utiliser ce type de tâche puisque les jeunes enfants manifestent généralement des difficultés pour discriminer les stimuli symétriques comportant un changement d'orientation droite/gauche (Thompson, 1975). En conséquence, ils maîtrisent également mal l'orientation des

lettres et confondent fréquemment les lettres miroirs (par exemple b et d). Alors qu'en vision la confusion est fréquente entre des formes en miroir, on peut se demander si ce type d'erreur existe également en perception haptique. Itakura et Imamizu (1994) ont testé cette hypothèse et ont évalué quelle était la modalité perceptive dominante pour discriminer des formes en miroir. Leur expérience consistait à présenter un stimulus en visuel (lettres de l'alphabet) ou en haptique suivi de la présentation de deux stimuli, un identique au premier et l'autre représentant son image en miroir. Les enfants de 3 à 6 ans avaient pour tâche de reconnaître dans la même modalité le stimulus présenté. Les résultats montrent qu'il n'existe pas, à tous les âges, de dominance de la vision sur le toucher pour cette tâche. Pour les enfants de 3 à 5 ans, le toucher permet une meilleure discrimination des formes et n'est pas affecté par les confusions d'orientation gauche/ droite. A partir de 6 ans, c'est la vision qui devient dominante et qui donne les meilleures performances.

Visuellement, la différence entre une lettre et son image en miroir n'est pas immédiate : les segments rectilignes et curvilignes sont les mêmes, seule leur position relative par rapport à un axe vertical change. En revanche, sur le plan moteur, écrire une lettre ou son inverse nécessite des mouvements très différents. Le programme moteur qui a été élaboré pour un caractère ne correspond pas à son image en miroir. Si ce programme moteur est activé automatiquement à la vue d'une lettre, il pourrait permettre d'éviter la confusion avec son image en miroir. L'utilisation des informations issues de la perception haptique en combinaison des informations visuelles pourrait permettre d'éviter les erreurs perceptives. Dans le cadre de l'évaluation de méthodes multisensorielles de lecture, dès 1928 Orton a souligné qu'un des intérêts de l'exploration haptique des lettres serait de remédier aux problèmes de confusion des lettres en miroir, fréquents chez les jeunes enfants.

Les travaux d'Orliaguet vont également dans le sens d'une non-dominance de la vision sur la proprioception chez les jeunes enfants. Orliaguet (1983) a comparé les appariements intramodaux vision-proprioception chez des enfants de 5 à 10 ans. En condition intramodale visuelle (V-V), les enfants devaient placer l'avant-bras d'un mannequin dans la même position qu'un modèle, vu précédemment. Dans la condition intramodale proprioceptive (P-P), les enfants, les yeux fermés, devaient placer leur bras dans la même position que celle donnée à leur bras précédemment par l'expérimentateur. Les résultats montrent que l'erreur absolue moyenne est plus élevée en condition V-V qu'en condition P-P à 5 ans, alors qu'à partir de 8 ans, c'est l'inverse qui est observé. Les perceptions s'organiseraient donc plus tôt dans la modalité proprioceptive que dans la modalité visuelle, puis cette relation s'inverserait au profit de la vision. Dans le cas de perception bimodale visuelle et proprioceptive conflictuelle (Orliaguet, 1985), les résultats permettent de mettre en évidence une capture proprioceptive à 5 ans, un compromis à 7 ans et une capture visuelle à partir de 9 ans.

En résumé, contrairement à ce qu'on observe chez l'adulte, la vision n'est pas dominante sur les perceptions proprioceptives chez les enfants de 5 ans. Nous allons maintenant examiner comment ces caractéristiques fonctionnelles de la modalité haptique peuvent expliquer les effets bénéfiques de l'ajout de la modalité haptique dans les entraînements classiques destinés à préparer l'apprentissage de la lecture, puis de l'écriture et enfin de la géométrie.

2. La préparation à l'apprentissage de la lecture

Le principe des systèmes d'écriture alphabétique (comme celui utilisé pour le français), consiste à représenter les sons des mots parlés à l'aide des symboles que sont les lettres. Pour apprendre à lire, l'enfant doit parvenir à découvrir ce principe (Deheane, 2007; Morais, 1994 ; O.N.L, 1998 ; Sprenger-Charolles et Colé, 2003), ce qui va lui permettre d'utiliser une procédure de lecture phonologique, qui consiste à traduire la séquence de lettres d'un mot lu en une séquence de sons correspondants. Cette procédure de décodage est essentiellement mise en œuvre au cours du cycle 2 (grande section/5-6ans, CP/6-7 ans, CE1/7-8 ans) et va permettre aux enfants de lire tous les mots réguliers, qu'ils soient connus ou non (Sprenger-Charolles et Casalis, 1996) et à terme de développer des procédures de lecture rapides, précises et automatiques. Des ressources cognitives pourront ainsi être libérées et allouées à la compréhension de textes écrits, objectif essentiel de l'apprentissage. Dans l'état actuel de nos connaissances, aucune recherche ne montre que l'enfant peut découvrir spontanément, par simple exposition au matériel verbal, le principe alphabétique et ainsi entrer dans l'apprentissage de la lecture. Il doit donc être accompagné et aidé dans cette découverte par un lecteur expert.

De nombreuses recherches ont étudié les facteurs qui permettent de prédire la réussite dans l'acquisition de la lecture avant le début de son apprentissage formel. Ainsi, ces recherches ont mis en évidence que les habiletés métaphonémiques (capacité à concevoir que les mots parlés sont constitués d'unités élémentaires, les phonèmes, et à les manipuler intentionnellement) et la connaissance des lettres constituent les meilleurs prédicteurs de la réussite future en lecture (Scarborough, 1998). Ces deux capacités permettent de comprendre le principe alphabétique et d'apprendre les associations lettre-son nécessaires pour décoder les mots écrits. Ces deux capacités permettent donc de comprendre et d'utiliser le principe alphabétique et des études montrent que lorsque celles-ci sont développées dans un même entraînement, les progrès en lecture sont alors les plus importants (Bara, Gentaz, et Colé, 2004a ; Byrne et Fielding-Barnsley, 1989, 1990 ; Byrne et Fielding-Barnsley, 1991).

Bien que ces entraînements préparent de manière efficace l'apprentissage de la lecture, cet apprentissage demeure, dans la majorité des cas lent et difficile, et certains enfants ne parviennent pas ou difficilement à appréhender la logique du principe alphabétique et à l'utiliser. Certains chercheurs se sont intéressés à d'autres aides possibles, ouvrant le champ aux méthodes multisensorielles d'apprentissage de la lecture (Bryant et Bradley, 1985).

2.1. Les premiers entraînements multisensoriels

Les travaux portant sur les troubles de l'apprentissage de la lecture suggèrent qu'une des difficultés de cet apprentissage résiderait dans le travail d'élaboration des connexions entre les représentations orthographiques des lettres et les représentations phonologiques correspondantes (Bryant et Bradley, 1985). C'est pour tenter de remédier à cette difficulté que ces auteurs ont préconisé l'utilisation d'une méthode « multisensorielle » d'apprentissage de la lecture qui ne sollicite pas uniquement les modalités sensorielles visuelle et auditive comme c'est le cas habituellement, mais également la modalité haptique. Le recours à la modalité haptique fournirait un moyen de favoriser la connexion, difficile à établir pour les jeunes enfants, entre les représentations orthographique et phonologique des mots.

Cette approche multisensorielle se situe dans la continuité de certaines activités pédagogiques proposées d'abord par Ytard (1800/1964) puis par Montessori (1915, 1958). Si cette approche n'a pas été validée expérimentalement dans le cadre de l'apprentissage de la lecture chez les jeunes enfants, elle a été exploitée dans le domaine de la remédiation des difficultés de lecture, où quelques recherches anciennes montrent les bénéfices de l'utilisation de la modalité haptique en complément des modalités visuelle et auditive.

Ainsi, Fernald (1943) a proposé une méthode multisensorielle (fortement inspirée des principes de Ytard et de Montessori) à des enfants présentant des retards en lecture. Cette méthode consiste à tracer avec son index un mot écrit tout en le prononçant et en le regardant. D'autres auteurs se sont inspirés de cette méthode dans leurs travaux expérimentaux. C'est le cas d'Ofman et Shaevitz (1963) qui comparent l'efficacité de la méthode du « tracé multisensoriel » et celle du « tracé visuel » et de la « simple lecture », dans une tâche d'apprentissage de mots nouveaux. La méthode du « tracé visuel » consiste à demander à l'enfant de suivre avec les yeux un mot qui s'écrit progressivement sur un écran. Les résultats révèlent que les faibles lecteurs (âgés en moyenne de 13 ans) parviennent mieux à apprendre des mots nouveaux avec les méthodes du « tracé multisensoriel » et du « tracé visuel » (qui ne diffèrent pas entre elles) qu'avec la méthode de la « simple lecture ». Ainsi, les auteurs font l'hypothèse que c'est l'induction d'un mouvement d'exploration (visuo-haptique ou visuel) dans l'appréhension d'un mot écrit qui faciliterait son apprentissage chez ce type de lecteurs. Certaines études suggèrent que les effets positifs sur le niveau de lecture obtenus suite à un entraînement multisensoriel seraient la conséquence d'une meilleure mémorisation des lettres explorées visuellement et haptiquement. Hulme (1979) montre, chez des enfants plus jeunes (8-9 ans), que l'exploration haptique de figures graphiques abstraites facilite leur mémorisation. L'exploration des figures se faisait soit en regardant chacun des items (condition V « Visuelle »), soit en regardant et en traçant simultanément du doigt chacun d'entre eux (condition VH « Visuo-Haptique »). Les résultats montrent qu'après une présentation en condition VH, les enfants ont obtenu significativement de meilleures performances en reconnaissance que ceux ayant bénéficié d'une présentation en condition V. Cette amélioration de la mémorisation des formes suite au traçage haptique serait l'opération d'un système distinct de la mémoire motrice. En effet, lorsqu'une tâche d'interférence motrice est présentée durant la période de rétention, seules les performances en condition VH sont détériorées. De même, une tâche d'interférence visuelle perturbe plus la mémorisation dans la condition V que dans la condition VH, ce qui va dans le sens de systèmes distincts d'encodage, visuel et moteur. Enfin, Hulme (1981) observe des résultats similaires avec des lettres chez des enfants en difficultés de lecture et des enfants normo-lecteurs (âgés en moyenne de 9 ans) et suggère que le double codage, moteur et visuel, permettrait une meilleure mémorisation des lettres.

2.2. Les entraînements Haptique-Visuel-Auditif-Métaphonologique « HVAM »

Une explication possible relative aux difficultés d'apprentissage de la lecture suggère que les enfants en difficulté de lecture et les apprentis-lecteurs auraient tendance à considérer les lettres et les sons comme deux entités séparées, ce qui rendrait difficile l'apprentissage de la lecture. Ainsi, Breznitz (2002) montre que des enfants dyslexiques de 9 et 10 ans présentent une faible synchronisation entre les traitements visuels et auditifs, en comparaison d'un groupe contrôle, et de ce fait

auraient des difficultés pour à établir le lien entre les représentations visuelles et auditives des mots.

Les spécificités fonctionnelles des différentes modalités sensorielles sollicitées lors de l'apprentissage de la lecture pourraient permettre d'expliquer pourquoi le lien entre la lettre traitée visuellement et le son traité auditivement, serait difficile à établir. En effet, les systèmes orthographique et phonologique font appel à des modalités et à des modes de traitement différents. Le processus phonologique se fait via la voie auditive et apporte les informations phonémiques sur les mots. Le processus orthographique apporte des informations sur les patterns visuels des lettres et des mots. Alors que l'information auditive-phonologique est traitée séquentiellement, l'information visuelle-orthographique est traitée d'une manière holistique. En conséquence, la discrimination et l'identification des mots est plus rapide par la voie visuelle que par la voie auditive. Nous avons formulé l'hypothèse selon laquelle la modalité haptique, compte tenu de ses caractéristiques de fonctionnement, faciliterait le lien entre les traitements visuel et auditif. La vision permet d'appréhender de manière quasi-simultanée les différentes propriétés des objets. Le vaste champ perceptif visuel permet en effet une appréhension globale et immédiate des objets. La modalité auditive a un fonctionnement plus successif et est adaptée pour percevoir les stimuli temporels tels que les sons de la parole. La modalité haptique partage des caractéristiques de fonctionnement aussi bien avec la modalité auditive qu'avec la modalité visuelle. Bien qu'ayant un fonctionnement en grande partie séquentiel, la modalité haptique peut traiter les mêmes informations spatiales que la vision, puisque l'exploration ne se déroule pas de façon linéaire. Alors que pour l'audition l'ordre d'apparition des stimuli est porteur de sens, la main peut revenir en arrière et explorer plusieurs fois la même partie d'un stimulus. En conséquence, nous avons fait l'hypothèse que la modalité haptique pourrait jouer un rôle de « ciment » entre les entités visuelles et les entités auditives.

Dans une première étude, nous avons évalué les effets de deux entraînements qui proposent de façon commune des activités destinées à développer la conscience phonémique ainsi que la connaissance des lettres et des associations lettre-son chez des enfants âgés de 5 à 6 ans (scolarisés en grande section de maternelle) mais qui se distinguent par le type d'exploration qui sous-tend le travail sur l'identité des lettres (Gentaz *et al.* 2003). Ainsi, l'entraînement dénommé HVAM (Haptique-Visuel-Auditif-Métaphonémique) sollicite les modalités haptique, visuelle et auditive et l'entraînement dénommé VAM (Visuel-Auditif-Métaphonémique) les modalités visuelle et auditive. Plus précisément, le travail sur l'identité des lettres en relief est basé sur une exploration visuo-haptique et haptique séquentielle dans l'entraînement HVAM et sur une exploration visuelle globale dans l'entraînement VAM. Les enfants (13 enfants par groupe) ont suivi un entraînement pendant 7 semaines : une séance d'entraînement par semaine de 30 minutes, centrée autour de l'étude d'un son (phonème) et de la lettre correspondante (graphème), et une séance de révision. Tous ont appris les lettres/sons a, i, r, t, p, et b (cf. Figure 1).

Tableau 1 — Déroulement des séances d'entraînement HVAM et VAM

Entraînement HVAM	Entraînement VAM
<p>La comptine : Chaque séance commence par la lecture d'une comptine qui contient le son étudié en un grand nombre d'exemplaires. Les enfants tentent de repérer le son qui va faire l'objet de la séance. La comptine est ensuite répétée phrase par phrase par les enfants, ce qui leur permet de prononcer plusieurs fois le son, et de se familiariser avec celui-ci.</p> <p>Les posters : on présente aux enfants des images correspondant soit à des mots qui commencent ou finissent par le son cible, soit à des mots distrayeurs (qui ne contiennent pas le son). Parmi six mots, chaque enfant doit trouver les trois mots qui commencent par le son étudié. Puis, ils doivent trouver parmi six autres mots, les trois qui finissent par ce son.</p>	
<p>Exploration haptique des lettres: Les enfants vont explorer tactilement des lettres en relief, de grande puis de petite taille, et parcourir avec leur index les courbes de la lettre. L'exploration se fait d'abord les yeux ouverts, puis les yeux fermés.</p> <p>Un test de discrimination tactile est ensuite effectué. Il consiste à distinguer la lettre apprise pendant la séance d'une lettre distrayante qui lui ressemble physiquement et ce après exploration haptique des deux lettres.</p>	<p>Exploration visuelle des lettres: Jeu de barrage : Les enfants ont pour tâche de barrer sur une feuille toutes les lettres cibles parmi des lettres distrayantes.</p> <p>Jeu de pioche : ils vont piocher chacun à leur tour, parmi plusieurs lettres face cachées, une lettre et la placer dans une des deux boîtes posées sur la table (une boîte pour la lettre étudiée et une boîte pour toutes les autres lettres)</p>
<p>Le jeu de cartes: Plusieurs images sont étalées sur la table. Les enfants doivent choisir chacun à leur tour une image qui correspond à un mot commençant par le son cible. Puis ils doivent choisir parmi d'autres images, celle qui illustre un mot qui finit par le son appris. Ce jeu s'achève lorsqu'il ne reste plus d'image cible à trouver.</p>	

Leurs performances ont été évaluées avant et après les entraînements au moyen d'un test d'identification de lettres, de deux épreuves de conscience phonémique (identification de phonèmes en position initiale et finale dans les mots) et d'un test de décodage de pseudo-mots. Les pseudo-mots sont composés uniquement des lettres étudiées pendant les entraînements. Il est précisé aux enfants que les mots sont inventés et qu'ils ne signifient rien (par exemple, « ila », « tiba »). Ils permettent de savoir si les enfants ont compris le principe alphabétique sans faire appel à leur vocabulaire. On constate une amélioration similaire après les deux entraînements dans les tests de conscience phonémique et d'identification de lettres. En revanche, on observe une amélioration du décodage de pseudo-mots plus importante après l'entraînement HVAM qu'après l'entraînement VAM. L'ensemble de ces résultats suggère donc que l'ajout de la modalité haptique dans ce type d'entraînement amplifie les effets bénéfiques sur la compréhension et l'utilisation du principe alphabétique chez les jeunes enfants telle que mesurées par la tâche de décodage de pseudo-mots.

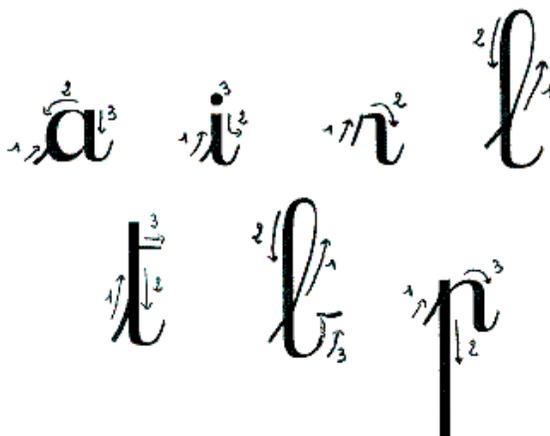


Figure 1 — Typographie des lettres utilisées dans les études. Les flèches numérotées indiquent l'ordre d'exploration des lettres.

Nous avons également évalué les bénéfices de l'entraînement visuo-haptique auprès d'une population plus importante (120 enfants testés âgés entre 5 et 6 ans), scolarisée en zone d'éducation prioritaire (Bara *et al.*, 2007, 2008). Ces enfants, qui présentaient des scores plus faibles que ceux de l'étude précédente en vocabulaire, connaissance de lettres et conscience rimique, peuvent être définis comme des enfants à risque de devenir mauvais lecteurs (Hatcher, Hulme, et Snowling, 2004). Les enfants ont été évalués, avant et après les entraînements en grande section de maternelle et en début de CP, avec les mêmes tests que dans l'expérience précédente. Les résultats obtenus révèlent une amélioration plus importante du décodage de pseudo-mots après l'entraînement HVAM qu'après l'entraînement VAM mais uniquement significative en CP. En fin de grande section de maternelle, les enfants du groupe HVAM présentent de meilleures performances que ceux du groupe VAM dans les tests d'identification de phonèmes et d'identification de lettres. Cet effet différé de l'entraînement HVAM sur les performances en décodage peut s'expliquer par les faibles performances en vocabulaire et connaissance des lettres présentées par ces enfants en début de grande section. En effet, avant l'apprentissage formel de la lecture, ces enfants sont en retard dans certains domaines langagiers impliqués dans l'acquisition de la lecture. L'exploration haptique, puisqu'elle favoriserait le lien entre le son et la lettre, permettrait d'améliorer les performances des enfants pour deux capacités langagières considérées comme des prérequis de l'apprentissage : la connaissance des lettres et l'identification de phonèmes. L'exploration haptique faciliterait ainsi la mémorisation des lettres, et, puisque la connaissance des lettres est interactivement liée à la conscience phonémique, on observe une amélioration des performances dans ces deux tâches. Le lien entre les lettres et les sons semble d'abord être développé de manière implicite par l'entraînement multisensoriel, puis cette connaissance implicite va être activée et devenir disponible dès le début de l'apprentissage formel de la lecture.

Dans une troisième étude, nous avons examiné si les effets bénéfiques observés après l'entraînement HVAM pouvaient s'expliquer par la séquentialité de l'exploration

des lettres elle-même (indépendamment des modalités sensorielles sollicitées) ou par l'exploration visuo-haptique et haptique *per se* (Bara, Gentaz, et Colé, 2004b). Trois entraînements (20 enfants par groupe), se différenciant par les modalités sensorielles sollicitées (visuelle, auditive et haptique) et par la manière d'explorer les lettres (séquentiellement ou globalement) ont ainsi été comparés. Les entraînements HVAM (incluant une exploration haptique et visuo-haptique séquentielle des lettres) et VAM (incluant une exploration visuelle globale des lettres) utilisés précédemment ont été proposés aux enfants. Un nouvel entraînement dénommé VAM-séquentiel a été introduit dans lequel les lettres sont présentées visuellement mais de manière séquentielle. Plus précisément, les lettres sont présentées aux enfants sur un écran d'ordinateur et s'inscrivent progressivement à vitesse constante. Pour évaluer le rôle de la séquentialité indépendamment des modalités sensorielles sollicitées, l'ordre d'exploration des lettres correspondant au sens de l'écriture est imposé dans les entraînements HVAM et VAM-séquentiel alors qu'il est global et sans ordre fixe dans l'entraînement VAM. Par ailleurs, la modalité haptique induit une exploration de lettre active et intentionnelle via la motricité (entraînement HVAM) alors que la modalité visuelle induit une exploration moins contrôlée cognitivement et davantage passive dans les entraînements VAM-séquentiel et VAM. Cette comparaison permet ainsi d'évaluer le rôle de l'exploration haptique *per se*. Les séances d'entraînement ont porté sur les lettres/sons a, i, r, l, t, p et b. Les résultats révèlent une amélioration similaire après les trois entraînements dans les deux tests de conscience phonémiques et d'identification de lettres et confirment ainsi les résultats observés dans les études précédentes. Bien que le nombre moyen de pseudo-mots décodés augmente significativement pour les trois types d'interventions, il reste néanmoins plus important après l'entraînement HVAM qu'après les entraînements VAM-séquentiel et VAM (qui ne diffèrent pas significativement). Ces résultats suggèrent donc que ce n'est pas l'exploration séquentielle des lettres indépendamment des modalités sensorielles qui explique l'amélioration des performances en décodage mais l'exploration visuo-haptique et haptique *per se*.

Cependant, une autre explication de l'absence d'effet de la condition VAM-séquentiel peut être proposée qui considère que dans cet entraînement les lettres s'inscrivent à l'écran à vitesse constante, ce qui ne correspond pas à un mouvement « naturel » d'écriture. Or, nous savons que les mouvements humains d'écriture obéissent à des lois de production motrice telle que la loi de puissance $2/3$ qui définit les liens existants entre la vitesse du mouvement et le rayon de courbure de sa trajectoire (Lacquaniti, Terzuolo, et Viviani, 1983). Ainsi, lors de la production d'une lettre (le *l* par exemple), la vitesse de traçage a tendance à augmenter lorsque la « courbure » diminue et à réduire lorsque celle-ci augmente. D'après les « théories motrices de la perception visuelle », les processus perceptifs seraient influencés et guidés par la connaissance que les sujets ont des règles de fonctionnement de leurs propres mouvements (cf. Viviani, 2002). Les informations temporelles et plus particulièrement l'organisation cinématique du mouvement joueraient un rôle décisif. Par exemple, ces informations seraient à l'origine de la prédiction de l'identité de mouvements d'écriture pas encore réalisés. Ainsi, Orliaguet, Kandel, et Boë (1997) ont montré l'importance des informations cinématiques (e.g. accélération, décélération) par rapport aux informations spatiales (e.g. la forme). Ainsi, les adultes prédisent mieux l'identité de la lettre (e ou *l*) qui suit la lettre l lorsqu'ils disposent des informations cinématiques biologiques que lorsqu'ils disposent uniquement des informations spatiales.

Si les informations cinématiques d'un mouvement d'écriture d'une lettre jouent un rôle dans son identification visuelle, on peut alors faire l'hypothèse que le non respect de la cinématique biologique des lettres dans l'entraînement VAM-séquentiel pourrait être responsable de l'absence d'effet observé par Bara *et al.* (2004). Nous avons donc repris et amélioré l'entraînement VAM-séquentiel de Bara *et al.* (2004) de manière à ce que les lettres se dessinent en accord avec l'ensemble des caractéristiques des mouvements biologiques (Hillairet de Boisferon *et al.*, sous presse). Ainsi, comme dans l'expérience précédente, nous avons comparé trois entraînements de préparation à la lecture : HVAM, VAM et VAM-biologique auprès d'enfants en grande section de maternelle. Pour l'entraînement VAM-biologique les lettres se dessinaient selon un mouvement biologique d'écriture (Figure 2).



Figure 2 — Extraits du film présentant au cours d'une séance de l'entraînement VAM-biologique présentant l'écriture naturelle d'un « l ».

Les résultats révèlent un progrès des performances pour tous les tests administrés avant et après chaque entraînement. Ces résultats sont en accord avec les études précédentes qui montrent que les programmes qui développent à la fois les habiletés métaphonémiques et la connaissance des lettres et des correspondances lettre-son favorisent la compréhension et l'utilisation du principe alphabétique nécessaire au décodage des mots écrits (Bus et Van Ijzendoorn, 1999 ; Ehri *et al.*, 2001). Cependant, l'amplitude des progrès dépend du type d'entraînement et du type de connaissances évaluées. Ainsi, nous avons observé un progrès des performances similaire après les trois entraînements pour les tests métaphonémiques et le test d'identification de lettres mais plus important pour le test de décodage de pseudo-mots après l'entraînement HVAM qu'après les entraînements VAM et VAM-biologique.

2.3. Discussion

Discutons maintenant des effets de nos entraînements évalués dans nos différentes expériences auprès des enfants ordinaires sur les trois types de variables mesurées. Tout d'abord, les tests d'identification de phonème en position initiale et finale permettent de mesurer les capacités métaphonémiques acquises par les enfants au cours des sessions d'entraînement. Les résultats confirment nos hypothèses. Les trois types d'entraînements ont permis une augmentation similaire des performances entre les pré-tests et les post-tests pour les tests métaphonémiques. Ce résultat s'explique par le fait que les activités proposées sont les mêmes quel que soit l'entraînement suivi par les enfants. Après les trois interventions, les enfants ont donc atteint un certain niveau d'habiletés métaphonémiques.

Le test de décodage de pseudo-mots permet une évaluation du niveau de compréhension du principe alphabétique et de son utilisation. En effet, la réussite à ce test requiert l'application des correspondances lettre-son travaillées au cours des

différentes sessions d'entraînement. À l'inverse, un échec à cette épreuve suggère une difficulté à utiliser ce principe alphabétique mais ne préjuge pas du niveau de compréhension de ce principe. On constate que les performances des enfants ont significativement augmenté entre les pré-tests et les post-tests pour chaque entraînement. Cependant, l'entraînement HVAM donne lieu à de meilleures performances que l'entraînement VAM pour toutes nos expériences. Ce résultat montre que l'exploration visuo-haptique et haptique des lettres serait plus efficace qu'une simple exploration visuelle pour comprendre et utiliser le principe alphabétique et par conséquent pour développer des habiletés de décodage chez les enfants. Cette interprétation générale découle indirectement des études qui montrent que les compétences métaphonémiques et la connaissance des lettres, en grande section de maternelle, constituent les meilleurs facteurs prédictifs de la réussite en lecture un an plus tard soit au cours de la première année de lecture. C'est au cours de cette année que l'on considère généralement que les habiletés de décodage des mots écrits se développent parmi lesquelles la procédure de médiation phonologique.

Par ailleurs, les performances observées après l'entraînement HVAM se révèlent supérieures à celles observées après l'entraînement VAM-séquentiel ou VAM-biologique (qui ne diffèrent pas significativement de l'entraînement VAM). On constate que l'exploration visuelle séquentielle des lettres ne permet pas d'obtenir les mêmes effets bénéfiques que l'exploration haptique séquentielle même lorsque les lettres se dessinent en respectant les lois de production motrice. Le fait qu'on obtienne des résultats similaires consécutivement à la perception d'un mouvement conforme ou non aux règles de production motrice pourrait s'expliquer par l'hypothèse selon laquelle la perception visuelle des mouvements dépendrait des capacités motrices des sujets et/ou de leur expérience visuelle. En effet, les enfants de 5 ans bénéficient d'une expérience visuelle des mouvements d'écriture réduite et n'ont pas encore acquis un geste d'écriture qui suit les mêmes lois motrices que l'adulte. Il est donc probable que les enfants ne tiennent pas compte dans nos entraînements des informations contenues dans la cinématique du mouvement et s'appuient davantage sur la forme visuelle du tracé de la lettre. Cette interprétation est corroborée par des résultats récents qui montrent que les enfants de 7 ans ne sont pas capables de tirer parti de l'information contenue dans la cinématique de la première lettre pour prévoir l'identité de la lettre qui suit (Louis-Dam, Kandel, et Orliaguet, 2000). Ces résultats suggèrent que les capacités perceptives d'anticipation relèveraient en partie de l'expérience motrice des sujets.

L'exploration manuelle des lettres volontairement initiée par les enfants serait la caractéristique principale pouvant expliquer l'efficacité de l'entraînement HVAM. Cet effet de la modalité haptique peut être dû au fait que les caractéristiques de l'exploration haptique chez les enfants de 5 ans semblent particulièrement bien adaptées pour percevoir de manière précise les objets. En effet, le sens haptique permet une meilleure discrimination des formes et des orientations. De plus, on n'observe pas encore, à cet âge, la dominance de la vision sur la proprioception.

Les résultats obtenus au test d'identification de lettres montrent, comme attendu, une amélioration similaire du nombre moyen de lettres correctement identifiées pour les différents entraînements. L'ensemble des résultats suggère que l'entraînement HVAM (et son exploration haptique des lettres en relief per se) aide les enfants à mieux établir les connexions entre les représentations orthographiques des lettres et les représentations phonologiques des sons correspondants, améliorant ainsi leurs capacités de décodage. La conscience phonémique et la connaissance des lettres

de l'alphabet sont des capacités indispensables à développer pour la compréhension et l'utilisation du principe alphabétique et par conséquent pour développer les mécanismes du décodage de l'écrit. Bien que les enfants identifient en moyenne le même nombre de lettres après les trois interventions, les enfants effectuant une exploration haptique et visuo-haptique sont plus capables d'utiliser cette connaissance pour décoder les pseudo-mots. On ne constate pas de supériorité de l'entraînement HVAM dans la connaissance des lettres qui pourrait expliquer la supériorité observée pour le décodage de pseudo-mots par une meilleure connexion entre les représentations des lettres et les représentations des sons correspondants via notamment une activation des représentations des lettres plus rapide et automatique. En effet, l'utilisation de l'exploration haptique dans l'appréhension des lettres pourrait engendrer une meilleure mémorisation et reconnaissance de la forme des lettres. L'exploration haptique des lettres implique un double codage en mémoire à la fois moteur et visuel. Ce double codage permettrait alors une meilleure activation des représentations des lettres qui se sont développées à l'aide de multiples sources d'informations. Le test de reconnaissance des lettres utilisé dans les expériences pourrait constituer une mesure globale de cette connaissance qui doit prendre en compte la reconnaissance des lettres mais également la rapidité à les reconnaître. La rapidité d'activation des représentations des lettres n'a pas été évaluée dans ces études et des recherches complémentaires sont donc nécessaires pour tester cette hypothèse.

En conclusion, l'ensemble des résultats confirme l'intérêt de l'ajout de la modalité haptique dans un entraînement qui combine un travail sur la connaissance des lettres et des associations lettre-son et un travail permettant de développer la conscience phonémique. La conséquence la plus notable de ce type d'entraînement est l'effet positif sur la compréhension et l'utilisation du principe alphabétique et donc sur les capacités de décodage de pseudo-mots des enfants. Même, si pour les trois interventions, de nets progrès des connaissances des lettres et des sons ont été observés, les résultats ne mettent pas en évidence un effet positif supplémentaire de la séquentialité de l'exploration indépendamment des modalités sensorielles et confirment le rôle bénéfique de l'exploration haptique per se. Voyons maintenant comment l'ajout de la modalité haptique peut aussi favoriser le tracé de lettres et donc l'écriture.

3. La préparation à l'apprentissage de l'écriture

Ecrire permet d'exprimer la pensée au moyen d'un système conventionnel de symboles générés sur un support par des mouvements du système bras-main. C'est une activité quotidienne qui demande peu de ressources cognitives chez l'adulte parce que son fonctionnement est automatisé. En conséquence, nous oublions que c'est une activité complexe qui nécessite la maîtrise et la coordination d'habiletés diverses, cognitives, perceptives et motrices. Plusieurs niveaux d'étude de l'écriture, qui se distinguent par la taille des unités prises en compte, peuvent être considérés. Le tracé de lettres permet d'étudier les aspects perceptivo-moteurs mis en œuvre dans l'écriture, la production de mots permet l'étude des processus orthographiques, et la production de textes permet d'évaluer la manière dont un sujet va transcrire un message sous forme écrite. Apprendre à écrire consiste globalement à acquérir une représentation visuelle de la lettre, qui guide sa production, et une représentation motrice, spécifique à chaque lettre. Cette acquisition se fait lentement et pose de nombreuses difficultés aux jeunes enfants. Ainsi, plusieurs années d'apprentissage

sont nécessaires pour qu'ils parviennent à une certaine maîtrise de cette habileté et la graphie de certaines lettres reste difficile à acquérir jusqu'en troisième année d'école élémentaire. L'enseignement de l'écriture fait partie des apprentissages fondamentaux de l'école élémentaire. Toutefois, dès l'école maternelle, l'enfant acquiert des compétences nécessaires à l'acte graphique, il est sensibilisé à l'écriture et apprend à écrire son prénom en lettres majuscules, scriptes et cursives, à copier quelques mots, à écrire sur une ligne puis progressivement entre deux lignes. Nous allons voir maintenant pourquoi il est important que les enfants apprennent à bien tracer les lettres (cf. Bara & Gentaz, 2007).

3.1. De l'utilité d'apprendre à bien tracer les lettres

3.1.1. Ecriture et lecture

L'apprentissage du tracé de lettres est étroitement lié à l'apprentissage de la lecture. La lecture et l'écriture se développent en parallèle et s'influencent mutuellement. En effet, la lecture et l'écriture se fondent au début de l'apprentissage sur un ensemble de connaissances et de processus communs ou en très forte interaction, comme par exemple les connaissances du système alphabétique. Dès le début de l'apprentissage de l'écrit, les enfants pourraient se servir des représentations motrices des lettres pour construire leurs représentations visuelles. Ainsi, Naka (1998) montre, chez des enfants japonais de troisième et de cinquième années de primaire, que la mémorisation de lettres est meilleure lorsque les enfants les apprennent en les écrivant que lorsqu'ils les voient. Il montre également que c'est l'utilisation du geste moteur qui permet une meilleure mémorisation et non pas l'apprentissage du sens de production des traits. En effet, même lorsque les enfants écrivent les lettres dans le sens inverse ou produisent les traits dans un ordre aléatoire, ils les mémorisent mieux que s'ils les voient simplement. Dans le même sens, Longcamp *et al.* (2005) ont fait apprendre à des enfants de maternelle, âgés de 3 à 5 ans, 12 lettres majuscules, soit à partir d'exercices d'écriture manuscrite, soit à partir d'exercices d'écriture au clavier. Les enfants ont été évalués au moyen d'un test de reconnaissance de lettres, qui consistait à discriminer les lettres étudiées parmi des distracteurs de trois types ; des lettres en miroir, des lettres ayant la même orientation mais la mauvaise forme (parties enlevées), et des lettres ayant la mauvaise orientation et la mauvaise forme. Les résultats montrent que la reconnaissance des lettres est meilleure quand les enfants les ont appris en utilisant l'écriture manuscrite. Cette amélioration est due à une diminution des erreurs de perception des lettres en miroir. Les auteurs concluent que la perception visuelle des lettres est facilitée si on y associe la perception kinesthésique. Renforcer les liens entre ces deux compétences (perceptives et motrices) améliorerait la mémorisation des lettres et pourrait permettre de favoriser la compréhension du principe alphabétique chez les jeunes enfants. Les méthodes multisensorielles s'appuient sur l'existence d'un lien fort en l'écriture et la lecture et supposent que renforcer ce lien permettrait d'améliorer les compétences en lecture des enfants.

3.1.2. Ecriture de lettres et production de textes

Les différents niveaux de la production écrite (production de lettres, de mots, et de phrases) sont interdépendants et s'influencent mutuellement. Le fonctionnement des différentes composantes de l'écriture s'effectuerait en temps réel lors de la production de textes, sous la contrainte d'une capacité limitée de traitement. Ainsi, l'élaboration du contenu, la réalisation textuelle et la transcription puiseraient dans

les mêmes ressources cognitives. Plusieurs études mettent en évidence le « coût cognitif » du processus grapho-moteur et les interférences qu'il induit sur les processus de construction et de génération des textes écrits. Ainsi, la qualité d'un texte est meilleure quand les enfants dictent leur production à une autre personne que lorsqu'ils l'écrivent eux-mêmes (Graham, 1990). De même, les enfants parviennent mieux à rappeler l'information et à produire des phrases à l'oral qu'à l'écrit (Bourdin et Fayol, 2000). Le processus de transcription du langage oral à l'écrit demanderait un coût cognitif important aux enfants et donc interférerait avec le processus de composition de texte. Les études qui évaluent les effets des entraînements sur le niveau d'écriture permettent également de mettre en évidence un lien entre le tracé de lettres et la production de textes. Ainsi, Graham, Harris, et Fink (2000) ont évalué les effets d'une instruction supplémentaire sur les performances en tracé de lettres et en composition de textes chez des enfants de 1^{ère} année d'école élémentaire ayant des difficultés d'écriture (écriture lente, difficultés dans la production écrite de textes). L'entraînement était composé de quatre activités. Les enfants chantaient l'alphabet en même temps qu'ils pointaient les lettres correspondantes. Puis, ils devaient tracer la lettre à partir d'un modèle dessiné sur une carte (la lettre était présentée avec des flèches pour indiquer le sens de l'écriture). Ils devaient ensuite copier une phrase contenant plusieurs exemplaires de la lettre-cible. Enfin, ils apprenaient à écrire la lettre d'une manière inhabituelle (longue et grande, courte et large) ou à l'utiliser comme partie d'un dessin. Les performances du groupe expérimental étaient comparées aux performances d'un groupe-contrôle qui recevait un entraînement phonologique. Les résultats montrent que les enfants du groupe expérimental ont obtenu de meilleures performances pour nommer et écrire les lettres que ceux du groupe-contrôle, immédiatement après l'entraînement et 6 mois plus tard. Ils présentent également de meilleures performances en composition de textes (mais essentiellement pour la rapidité de production écrite).

En résumé, ces expériences suggèrent que les aspects liés à la programmation et à l'exécution motrice (évalués par exemple par la vitesse du tracé de lettres isolées) sont liés de manière causale aux aspects de composition et de génération de textes écrits, et soulignent l'importance pour l'enfant d'acquérir un tracé fluide et automatique.

3.2. Le développement des tracés de lettres

3.2.1. Analyse descriptive des changements

Le tracé de lettre est une activité gérée par des règles de production motrice. Ces règles décrivent des constances dans la manière d'écrire chez les enfants et les adultes. La métaphore « grammaire de l'action » a été proposée pour définir les règles de production des traits (Goodnow et Levine, 1973). Pour dessiner des figures géométriques, les enfants commencent à un âge donné par le même point et procèdent dans la même direction. Pour écrire leurs premières lettres, les enfants utilisent en général les mêmes règles de production motrice que celles utilisées pour le dessin. Certaines études ont montré que les règles de production du dessin influencent l'écriture de la même manière que l'apprentissage de l'écriture provoque des changements dans ces règles. Par exemple, on constate que les jeunes enfants dessinent les cercles dans le sens des aiguilles d'une montre alors que les enfants plus âgés préfèrent le sens inverse. Ce changement dans l'ordre préférentiel du tracé serait la conséquence de l'apprentissage de l'écriture, puisque, contrairement aux

languages qui utilisent l'alphabet latin, aucun changement n'est observé dans le sens du tracé des cercles chez les enfants qui apprennent à écrire en hébreu (de droite à gauche).

Le sens de rotation de l'écriture des lettres cursives, qui se fait dans le sens anti-horaire, impose des contraintes motrices fortes et de ce fait ne serait pas utilisé spontanément par les jeunes enfants. En effet, ce n'est que vers trois ou quatre ans, que les enfants sont capables de produire des cercles dans le sens des aiguilles d'une montre ainsi que dans le sens inverse avec chaque main (Lurçat, 1974). Cette compétence serait un pré-requis pour l'acquisition de l'écriture. Le changement dans certaines de ces règles (changement du sens de rotation préférentiel des cercles), nécessaire pour la production motrice de l'écriture, est une acquisition difficile pour le jeune enfant, et nécessite une pratique intensive des activités d'écriture.

Au fur et à mesure de l'apprentissage de l'écriture, des différences aussi bien quantitatives (vitesse) que qualitatives (lisibilité) vont apparaître. L'émergence de ces différences s'explique non seulement par l'apprentissage en classe mais également par la maturation du système moteur qui permet à l'enfant d'exécuter les gestes fins requis pour former les lettres. L'évolution de l'écriture avec l'âge concerne à la fois les aspects statiques (forme, taille, agencement des lettres dans l'espace) et cinématiques de l'écriture (durée, vitesse, nombre et durée des pauses, dysfluente, qui correspond au nombre de pic d'accélération et de décélération dans le mouvement).

Entre 7 et 9 ans, on observe une progression globale des différents indices statiques et dynamiques, avec une diminution progressive de la taille du tracé, de la dysfluente, de la durée de réalisation de la trace, et du nombre et de la durée des pauses. La variabilité des productions pour un même enfant tend également à diminuer. Entre 9 et 10 ans, la durée, la dysfluente et le nombre de pauses continuent de diminuer. On observe une forte augmentation de la vitesse, qui engendre un déclin temporaire de la précision et donc de la qualité de la trace produite. La stagnation dans la qualité de l'écriture, observée après la troisième année d'école élémentaire, s'expliquerait par les priorités de l'instruction (diminution de l'intérêt pour la réalisation graphique), l'exigence de vitesse et une recherche de l'efficacité dans l'écriture. Cette recherche de vitesse se traduirait par la personnalisation de l'écriture, et en effet, les enfants qui utilisent un style mixte, cursif et script, écrivent plus vite que ceux qui utilisent uniquement l'écriture cursif ou script. A partir de 10 ans, les changements observés sont mineurs et vont dans le sens d'une amélioration de l'automatisation de l'écriture et d'une économie dans la production motrice.

3.2.2. D'un contrôle rétroactif à un contrôle proactif

Les changements dans les aspects statiques et dynamiques de l'écriture, observés lors des premières années d'apprentissage, pourraient être la conséquence du passage d'une stratégie de contrôle rétroactif (basé sur les feedback sensoriels) à une stratégie de contrôle proactif (basé sur une représentation interne du programme moteur) (Zesiger, 1995). Au début de l'apprentissage, les enfants utilisent, au cours du tracé de la lettre, les feedback sensoriels (visuels et kinesthésiques) issus de leurs propres mouvements manuels (qui doivent être nécessairement lents, pour que les informations sensorielles puissent être recueillies et utilisées). Avec l'apprentissage et l'automatisation de l'écriture, un mode de contrôle proactif des mouvements deviendra dominant. Ainsi, les enfants n'auront plus besoin de

feedback sensoriels pour tracer une lettre, car ils pourront recourir à un « programme moteur » comprenant des commandes motrices centrales nécessaires et suffisantes pour la tracer correctement et rapidement. La production de la trace devient rapide, ce qui ne laisse plus le temps au système de traiter les informations sensorielles et de les utiliser afin de contrôler le déroulement de l'écriture.

Globalement, on constate que l'absence de feedback visuel a des effets plus importants chez les jeunes enfants que chez les enfants plus âgés et les adultes. En l'absence de feedback (yeux bandés), la durée du mouvement, et la dysfluente augmentent (Chartrel et Vinter, 2006). Les différences entre « avec » et « sans feedback » sont plus importantes pour les enfants les plus jeunes (8 et 9 ans). En l'absence de feedback visuel, les enfants auraient tendance à essayer de maximiser les informations kinesthésiques en augmentant la taille des lettres produites. Ces feedback pourraient contribuer à l'élaboration des représentations internes du mouvement sur lesquelles s'appuient les enfants plus âgés et les adultes.

3.2.3. Vers une augmentation de la taille de l'unité du programme moteur

La taille de l'unité de base du programme moteur évoluerait également au cours de l'apprentissage de l'écriture. Prêteur et Telleria-Jauregui (1986) étudient, dans une tâche de copie de phrases, l'évolution de l'empan de transcription (nombre de séquences écrites sans recours au modèle) chez des élèves de première année d'école élémentaire. Ils analysent le nombre de coups d'œil au modèle, nécessaires pour la copie et le type d'unité transcrite entre chaque coup d'œil. Les résultats révèlent un changement dans la taille des unités transcrites sans recours au modèle au cours de l'année scolaire. En début d'année, les élèves recopient des morceaux de lettres, puis des lettres entières et, en fin d'année, des morceaux de mot ou des petits mots entiers. Globalement, les enfants copient d'abord lettre par lettre pour passer ensuite à une copie de mots entiers. L'acquisition de l'écriture se traduirait par l'augmentation de la taille des unités contenues dans le programme moteur. Les enfants les plus jeunes effectueraient des petits traits successifs aboutissant à la formation d'une lettre. La taille de ces traits deviendrait de plus en plus importante et atteindrait le format d'une lettre.

En résumé, la qualité et la vitesse d'écriture augmentent graduellement avec l'âge mais tendent à stagner du point de vue de la qualité à partir de la troisième année d'école élémentaire. L'acquisition de l'écriture se traduit par l'élaboration de programmes moteurs de plus en plus sophistiqués, par un passage progressif d'un contrôle rétroactif des mouvements d'écriture vers un contrôle proactif et par une augmentation de la taille de l'unité de base du programme moteur.

3.3. Les exercices classiques

L'enseignement de l'écriture a pour premier objectif de montrer aux enfants comment reproduire les lettres selon un modèle. L'enfant doit être capable de percevoir non seulement la forme du modèle mais également la déviation de sa propre production par rapport au modèle. Les programmes d'intervention permettent d'automatiser les aspects moteurs de l'écriture, en proposant différents exercices spécifiques, de façon à ce que les ressources de la mémoire de travail soient libérées pour les aspects linguistiques de l'écriture.

Tracer des arcades et des cercles. Certaines activités de pré-écriture permettraient de préparer efficacement les enfants à l'apprentissage de l'écriture. Ces activités

consistent à tracer des arcades et des cercles, qui sont les bases de la forme des lettres (Smits-Engelsman *et al.* 2001). Les résultats montrent que la qualité du tracé de lettres des enfants de maternelle qui ont reçu ce type d'entraînement s'améliore de manière significative en comparaison d'un groupe-contrôle.

Présenter les lettres verbalement et visuellement. Lors de l'apprentissage de l'écriture l'enfant se trouve en général dans une situation où il est confronté à un modèle de la lettre qu'il doit recopier. Plusieurs manières de présenter le modèle aux enfants peuvent être envisagées. Il semblerait que la présentation visuelle des lettres associée à des commentaires verbaux sur la manière de les former donne de meilleures performances dans la qualité du tracé des lettres en comparaison d'une présentation uniquement visuelle. Kirk (1981) a proposé à des enfants de 4-5 ans d'apprendre des lettres selon quatre conditions expérimentales : (1) démonstration visuelle, (2) démonstration verbale, (3) combinaison des informations verbales et visuelles, (4) copie des lettres sans aucune démonstration préalable. Les résultats montrent que les enfants qui ont bénéficié d'une démonstration à la fois visuelle et verbale sont ceux qui ont obtenu les meilleures performances dans la qualité du tracé. Berninger *et al.* (1997) ont sélectionné des enfants de 1ère année d'école élémentaire, ayant des difficultés pour apprendre à écrire, et les ont répartis dans quatre groupes expérimentaux et dans un groupe-contrôle (effectuant des exercices destinés à développer leur conscience phonémique). Cette étude avait pour objectif de déterminer quelle méthode permettrait d'améliorer la trace écrite et de ce fait la qualité de la production des textes écrits. Les quatre méthodes de préparation à l'écriture sont les suivantes : (a) l'enfant écrit la lettre après avoir vu l'expérimentateur l'écrire, (b) l'enfant écrit la lettre en s'aidant d'un modèle de la lettre comportant des flèches qui indiquent le sens et l'ordre d'écriture de chaque trait, (c) l'enfant écrit la lettre de mémoire après avoir examiné un modèle de cette lettre, (d) l'enfant écrit la lettre de mémoire après avoir examiné un modèle de cette lettre comportant des flèches qui indiquent le sens et l'ordre d'écriture de chaque trait. Les résultats montrent que les quatre groupes expérimentaux ont amélioré leur niveau d'écriture de manière plus importante que le groupe-contrôle. Le groupe qui a obtenu les meilleures performances en tracé de lettres est celui qui a suivi l'intervention (d).

Ces résultats suggèrent que la capacité des enfants à percevoir précisément la forme des lettres est un facteur important pour le développement de la qualité de l'écriture. Le traitement commencerait par la perception et le stockage en mémoire de la forme des lettres. La qualité du tracé des lettres dépendrait de la qualité des références en mémoire pour le système moteur.

Demander à l'enfant d'évaluer la qualité de son écriture. Les entraînements à l'écriture dirigés par l'enfant se basent sur l'utilisation d'une réflexion systématique de l'enfant après chaque exercice d'écriture (Jongmans *et al.* 2003). L'enfant doit écrire la lettre plusieurs fois et indiquer celle qui est la mieux réussie. Il forme ensuite plusieurs paires de lettres contenant la lettre-cible et doit déterminer quelle paire est la mieux écrite. Enfin, la dernière étape passe du niveau moteur au niveau sémantique, et l'enfant doit utiliser la lettre dans un mot ou une phrase. Les résultats montrent que les enfants faibles scripteurs qui ont reçu ce type d'entraînement améliorent de manière plus importante la lisibilité de leur écriture que les enfants d'un groupe-contrôle.

3.4. L'entraînement visuo-haptique avec Télémaque

Une interface, appelée « Télémaque », qui utilise un bras robot à retour d'effort a été mise au point dans le but d'améliorer la fluidité des mouvements d'écriture. Ce bras robot peut guider le stylet et ainsi contrôler non seulement la forme mais également la dynamique du mouvement d'écriture. Cette interface permet d'apprendre aux enfants à reproduire une lettre selon un standard qui n'est pas seulement statique (forme correcte) mais aussi dynamique (règles de production motrice, cf. Viviani, 1994). Les détails mathématiques sont publiés dans (Hennion *et al.* 2005), en particulier le fait que la triple continuité en chaque point de contrôle permet de bâtir une fonte compatible en tout point avec les lois psychophysiques observées chez les adultes (cf. Viviani, 1994).



Figure 3 — Vue schématique du dispositif global

Trois exercices ludiques, utilisant l'interface, ont ainsi été créés ; (1) le jeu du circuit dans lequel l'enfant doit reproduire la lettre en restant à l'intérieur d'un rail plus ou moins large, (2) le tracé dynamique dans lequel le bras robot guide le stylet dans des mouvements spatiaux et dynamiques qui dessinent les contours de la lettre et le (3) la reconnaissance des lettres sans feedback visuel. Ce programme a pour objectif d'améliorer non seulement la perception visuelle de la lettre mais aussi l'acte moteur qui doit être produit pour écrire la lettre.

Deux expériences ont été mises en place afin d'évaluer les apports de Télémaque chez des enfants d'âges différents. La première a eu pour but de tester les effets d'un entraînement, utilisant cette interface, chez des enfants de première année de primaire, âgés de 6-7 ans (Palluel-Germain, *et al.*, 2006). La deuxième s'est intéressée à l'évaluation de Télémaque auprès d'enfants plus jeunes, âgés de 5-6 ans, moins expérimentés dans l'acte de tracer des lettres (Palluel-Germain, *et al.*, 2007). Le principe général de cette évaluation est de comparer les effets d'un entraînement utilisant Télémaque aux effets d'un entraînement « contrôle », similaire

mais n'utilisant pas l'interface, sur l'écriture de lettres (rapidité et fluidité des tracés). L'entraînement visuo-haptique comprenait quatre exercices, deux communs avec l'entraînement contrôle (un exercice de coloriage d'une lettre, et un puzzle de lettre composé de 4 pièces) et deux spécifiques avec Télémaque (le jeu du circuit et le tracé dynamique). L'entraînement contrôle comportait deux exercices spécifiques, un de copie de la lettre et de jugement de la qualité globale du tracé et un autre de copie de phrase avec un clavier d'ordinateur.

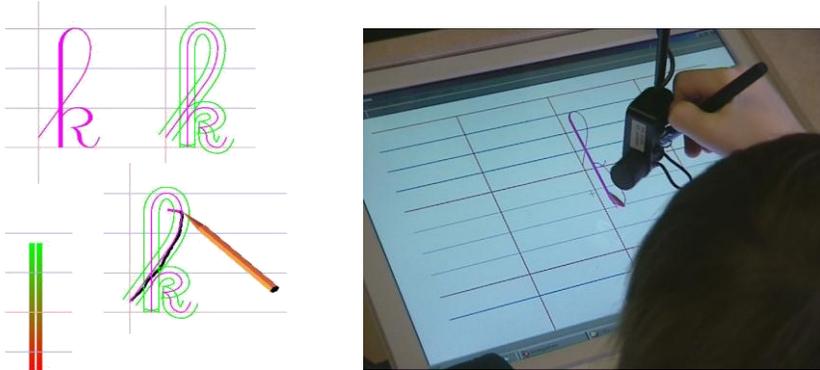


Figure 4 — *Jeu du circuit et du tracé dynamique de la lettre*

Dans la première expérience, 22 enfants de première année de primaire (6/7 ans) ont été soumis à trois phases (de janvier à avril de l'année scolaire). Lors de la première phase, nous avons demandé aux enfants d'écrire 4 lettres cursives (b, f, k, s) sur une tablette graphique, nous permettant ainsi de mesurer des indices tels que le temps de mouvement ou la forme des tracés. Par ailleurs, lors de cette première phase, chaque enfant passait le test des carrés du WPPSI (niveau de performance non verbale). A la suite de cette première phase étaient constitués, sur la base de ces tests et sur l'âge, deux groupes d'enfants équivalents. Lors d'une seconde phase (phase d'entraînement) les enfants étaient ainsi, soit dans un groupe utilisant Télémaque (T) soit dans un groupe Contrôle (C). Lors de cette phase, une lettre spécifique (b, f, k, s) était entraînée pendant chaque intervention (une par semaine). Concernant l'entraînement du groupe T, les enfants étaient assis confortablement et devaient tenir naturellement le stylo de l'interface visuo-haptique (voir figure 3). Un moniteur placé horizontalement retransmettait simultanément les lettres générées par Télémaque et un moniteur placé face à l'expérimentateur permettait de contrôler les exercices de l'interface. Lors de chaque intervention les enfants réalisaient les trois exercices générés par Télémaque : 1) le jeu du circuit : l'enfant devait reproduire 8 fois la lettre en restant à l'intérieur d'un rail plus ou moins large (voir figure 4, ici Télémaque force l'enfant à rester à l'intérieur des rails avec une force pouvant être réglé par l'expérimentateur) , 2) le tracé dynamique : le bras robot guidait le stylo de l'enfant dans des mouvements spatiaux et dynamiques qui dessinent les contours de la lettre (l'enfant réalisait cet exercice 5 fois) , 3) la reconnaissance de lettres sans feedback visuel : l'enfant avait les yeux bandés et devait reconnaître la lettre générée par l'interface. Parallèlement, les enfants du groupe C devaient colorier et réaliser un puzzle représentant la lettre cible entraînée lors de l'intervention. Dans la troisième phase (deux semaines après cette phase d'entraînement), l'ensemble des enfants devaient écrire les 4 lettres cibles (b, f, k, s) sur une tablette graphique, comme dans

la première phase. Nous avons analysé le temps de mouvement réalisé pour chaque lettre ainsi que le nombre de pics de vitesse. Ces indices permettent d'examiner la fluidité du mouvement : plus le mouvement est fluide et rapide moins le nombre de pics de vitesse est important.

Les résultats montrent tout d'abord que les enfants du groupe ayant été entraînés avec Télémaque tracent les lettres avec un temps de mouvement moins long au post-test par rapport à leur niveau de base (pré-test) et un mouvement plus fluide (le nombre de pics de vitesse est moins important lors du post-test). En revanche, les enfants du groupe contrôle (n'ayant pas été entraînés avec Télémaque) ne montrent pas de différence statistiquement significative entre le pré- et le post-test en ce qui concerne le temps de mouvement et le nombre de pics de vitesse.

Le but de la seconde expérience était de voir si Télémaque pouvait être bénéfique chez des enfants qui débutent dans le tracé de lettres cursives et avec un plus grand nombre d'enfants et un plus grand nombre de lettres. Après avoir testé 42 enfants lors d'une première phase (pré-test), 21 enfants étaient entraînés avec Télémaque et 21 enfants étaient assignés à un groupe contrôle (lettres cibles entraînées : a, b, f, i, l et s). Les résultats montrent une amélioration des performances entre le pré- et le post-test plus importante pour les enfants du groupe Télémaque par rapport à ceux du groupe contrôle : leur vitesse d'écriture est plus rapide et le nombre de lever de crayon diminue, témoignant d'un mouvement plus fluide.

En résumé, l'ensemble de ces premiers résultats montre que l'utilisation de Télémaque est bénéfique dans l'apprentissage du tracé des lettres chez des enfants « expérimentés » en CP mais également chez des enfants débutants (GSM ; 5/6 ans) dans le tracé de lettres. Télémaque permettrait à l'enfant d'incorporer des lois de production motrice, en aidant les enfants à passer d'une stratégie de contrôle rétroactif à une stratégie de contrôle proactif.

4. La préparation à l'apprentissage de la géométrie classique

L'acquisition de connaissances géométriques élémentaires est essentielle à l'être humain pour comprendre et transformer son environnement. Les figures géométriques élémentaires planes (cercle, carré, rectangle et triangle) peuvent être considérées comme des catégories (Neisser, 1976) comprenant une infinité d'exemplaires qui partagent des propriétés géométriques. La première question est alors d'examiner comment les jeunes enfants arrivent à traiter de la même manière des exemplaires d'une catégorie et donc à dépasser leurs spécificités au profit de leur généralité. Cette activité de catégorisation permettra ainsi à l'enfant d'organiser ses connaissances géométriques et de les généraliser à des exemplaires nouveaux. La deuxième question est d'étudier ensuite comment favoriser cette acquisition. Les évaluations réalisées dans différents pays à différents niveaux d'étude révèlent que cette dernière est loin d'être triviale à tous les niveaux scolaires et aussi bien en France qu'aux USA.

Deux modèles ont servi (et servent encore dans certains cas) de référence pour mieux comprendre le développement ontogénétique de la pensée spatiale et ses conséquences cognitives. Le premier, développé par Piaget et Inhelder (1947), propose schématiquement que la représentation de l'espace se construit au cours du développement avec le passage par trois stades : d'abord serait construit l'espace

topologique, puis presque simultanément les espaces projectif et euclidien. Dans ce premier stade topologique, ni les formes, ni les distances, ni les droites et les angles ne sont conservés, et l'enfant n'est sensible qu'à certaines relations internes à la figure (distinction entre figure ouverte et figure fermée, entre intérieur et extérieur et généralement sensibilité aux relations de voisinage). Les auteurs se basent sur deux arguments expérimentaux pour justifier l'existence de ce stade. Le premier se fonde sur les expériences de reconnaissance visuo-haptique de différents objets, l'autre sur l'analyse de la production de dessins de figures géométriques. Les résultats des observations montrent que seules les relations topologiques sont d'abord prises en considération par l'enfant. Ainsi, vers trois à quatre ans, l'utilisation de ces seuls rapports topologiques entraîne par exemple des confusions entre carré, triangle, et cercle. Il faut attendre six à sept ans et une plus grande activité perceptive pour que les enfants reproduisent correctement et aisément ces figures. Mais de nombreuses données empiriques recueillies depuis lors ne sont pas toujours en accord avec les descriptions des stades de Piaget et Inhelder et suggèrent un développement plus précoce de l'espace euclidien (cf. Clements et Battista, 1992). Par exemple, plusieurs recherches ont montré que les enfants, dès 2-3 ans, pouvaient distinguer les figures curvilignes des figures rectilignes sous certaines conditions (Lovell, 1959). Une étude de Martin (1976) rapporte aussi que les dessins produits par des enfants de 4 ans ne reflètent pas majoritairement les caractéristiques topologiques.

Le second modèle de développement est celui proposé par van Hiele (1986). Les auteurs proposent que la pensée géométrique des élèves évolue selon une progression en cinq stades successifs. Au cours du premier niveau (visualisation), les élèves perçoivent les objets géométriques en fonction de leur apparence physique. Ils raisonnent au moyen de considérations visuelles (prototypes visuels) sans utiliser explicitement les propriétés de ces objets. Par exemple, les élèves considèrent qu'un losange est un losange « parce qu'il est sur pointe » ou qu'une hauteur est une hauteur « parce qu'elle est verticale ». Le second niveau est celui de l'analyse. Les élèves sont capables d'associer les objets géométriques à leurs propriétés. Cependant, ils utilisent une suite de propriétés nécessaires pour l'identification et la description de ces objets. A ce niveau, les élèves considèrent qu'un carré est un carré parce qu'il possède 4 côtés de même longueur, 4 angles droits et que ses côtés opposés sont parallèles. Le troisième niveau est celui de l'abstraction. Les élèves sont capables d'ordonner les propriétés des objets géométriques, de construire des définitions abstraites, de distinguer les propriétés nécessaires des propriétés suffisantes pour la détermination d'un concept et de comprendre les déductions simples. Cependant, les démonstrations ne sont pas acquises. Pour exemple, les élèves considèrent qu'un carré est un carré parce que c'est un rectangle ayant 4 côtés de même longueur. L'avant-dernier niveau est celui de la déduction. Les élèves sont capables de comprendre le rôle des différents éléments d'une structure déductive et d'élaborer des démonstrations originales ou du moins de les comprendre. Par exemple, les élèves sont capables de démontrer qu'un parallélogramme ayant deux côtés consécutifs de même longueur est un losange. Le cinquième et dernier niveau est celui de l'axiomatisation. Les élèves sont capables de travailler dans des systèmes axiomatiques différents et d'étudier des géométries variées en l'absence de modèles concrets. Ainsi, par exemple, ils sont capables de comprendre des géométries non euclidiennes.

Selon les auteurs, l'avancement d'un niveau à l'autre dépendrait davantage du contenu et du mode d'instruction que de l'âge, et chaque niveau posséderait son propre vocabulaire et son propre système de relations. Contrairement au modèle de

Piaget et Inhelder, celui de van Hiele influence encore aujourd'hui beaucoup les recherches sur le développement de la pensée géométrique. Des recherches affinent le modèle de van Hiele en montrant par exemple l'existence d'un niveau « pré cognitif » avant le niveau 1 (visualisation). A ce niveau 0, les enfants percevraient des formes géométriques, mais peut-être en raison d'une insuffisance dans l'activité perceptive (Piaget et Inhelder, 1948), pourraient seulement se préoccuper des caractéristiques visuelles d'une forme et ainsi ne pas identifier beaucoup de formes communes. Nos recherches s'intéressent seulement aux premiers niveaux de ce modèle à travers deux questions générales.

4.1. Les connaissances géométriques des enfants de 5 ans

Clements *et al.* (1999) étudient la façon dont les enfants de 3 à 6 ans différencient les exemplaires d'une catégorie de figure parmi d'autres figures. Pour se faire, 97 enfants sont évalués au cours d'un entretien individuel dans lequel on demande à chaque enfant de marquer chaque figure cible. L'ensemble des tests est présenté en annexe 1. Les auteurs mesurent le nombre de figures cibles correctement reconnues parmi les distracteurs pour 3 groupes d'âge (4, 5 et 6 ans). Les résultats révèlent une augmentation des performances avec l'âge, pondérée par les figures (cercle, carré, rectangle et triangle). Ainsi, le cercle est très bien reconnu à tous les âges : 92 % à 4 ans, 96 % à 5 ans et 99 % à 6 ans. Le carré est reconnu à 82 % à 4 ans, à 86 % à 5 ans et à 91 % à 6 ans. Le rectangle est reconnu à 51 % à 4 ans, à 51 % à 5 ans et 59 % à 6 ans. Enfin, le triangle est reconnu à 57 % à 4 ans, à 58 % à 5 ans et 61 % à 6 ans. Il est cependant difficile de comparer les connaissances des enfants d'une figure à l'autre sans un contrôle plus rigoureux des figures cibles et distractrices proposées. En effet, le nombre de figures cibles et le nombre de figures total ne sont pas les mêmes pour les quatre tests. De plus, le choix des figures (la taille et l'orientation) n'est pas contrôlé. Dans l'ensemble, cette recherche présente des résultats intéressants mais qui méritent d'être confirmés avec une méthodologie plus rigoureuse (de la construction des tests aux traitements statistiques des données).

Pinet et Gentaz (2007) ont proposé une expérience qui tente de répondre à ces objections. Ils ont étudié les propriétés géométriques et/ou spatiales des exemplaires des figures qui pourraient influencer leur reconnaissance par les jeunes enfants. S'il existe plusieurs propriétés qui peuvent jouer un rôle (e.g. le centre de masse ; Baud-Bovy et Soechting, 2001, Baud-Bovy et Gentaz, 2004), deux semblent candidates pour jouer un rôle crucial.

(a) La présence d'un axe de symétrie vertical pourrait certainement jouer un rôle important et favoriser cette reconnaissance. En effet, Fisher, Ferdinandsen et Bornstein (1981) montrent que la symétrie verticale joue un rôle d'organisation dans la perception visuelle des formes dès l'âge de 4 mois. À cet âge, les bébés regardent plus longtemps une figure avec un axe de symétrie vertical qu'une figure asymétrique ou avec un axe de symétrie horizontal. Cet effet facilitateur de la symétrie verticale sur la reconnaissance des figures est aussi observé chez les enfants (Bornstein et Stiles-Davis, 1984) et des adultes (Royer, 1981; cf. Rock, 1983). Notre première hypothèse est que la reconnaissance des figures géométriques élémentaires par les enfants est déterminée en partie par leur nombre d'axes de symétrie. En d'autres termes, plus une catégorie de figure contiendra d'axes de symétrie, plus elle sera facile à reconnaître. Ainsi, comme le cercle est une figure contenant une infinité d'axes de symétrie, elle devrait être la figure la plus facilement reconnaissable. Ensuite, le carré avec quatre axes de symétrie devrait être mieux reconnu que le

rectangle qui a seulement deux axes de symétrie. Enfin, la reconnaissance du triangle devrait dépendre du type de triangle considéré : l'équilatéral contient trois axes de symétrie, l'isocèle deux et le « quelconque » aucun. Notre seconde hypothèse est que la reconnaissance des figures serait aussi déterminée par l'orientation des axes de symétrie par rapport au corps du sujet, aligné la plupart du temps sur la gravité.

(b) Excepté pour le cercle, l'examen des manuels scolaires et des erreurs commises par les jeunes enfants suggèrent que les exemplaires prégnants reconnus correctement par les enfants présentent des rapports spécifiques entre les longueurs des côtés. Très souvent, la longueur d'un rectangle est une fois et demi plus grande (environ) que sa largeur et, en ce qui concerne le triangle, on retrouve soit des triangles équilatéraux, soit des triangles isocèles avec une base une fois et demie plus courte que les deux autres côtés isométriques. De plus, les figures sont représentées avec le plus grand côté aligné à l'horizontale et servant de base à la figure. Ces dernières caractéristiques spatiales permettent de définir un degré de typicalité de chaque exemplaire d'une figure. Cette définition est très proche de celle proposée par Rosch *et al.* dans le domaine des catégories et des concepts d'objets (Rosch, 1973, 1975; Rosch et Mervis, 1975). Selon ces auteurs, chaque catégorie inclurait des exemplaires très représentatifs (c'est-à-dire possédant beaucoup d'attributs caractéristiques de la catégorie) et des exemplaires moins représentatifs. Le triangle équilatéral peut, par exemple, être considéré comme très représentatif de la catégorie triangle, le triangle quelconque comme très peu représentatif. Pour retenir une catégorie, il suffirait de conserver en mémoire un représentant type (le prototype), possédant de nombreux attributs caractéristiques de la catégorie. Notre système cognitif s'organiserait donc autour d'un « noyau de sens » ou « *core meaning* », représenté par des éléments prototypiques. Le prototype est décrit classiquement comme le point de référence. Il correspond à l'exemplaire le plus représentatif de la catégorie, partageant un maximum de propriétés avec les autres membres de la catégorie et un minimum avec ceux des catégories contrastées (Rosch et Mervis, 1975). En dehors du prototype, les autres membres de la catégorie peuvent être hiérarchisés sur un gradient de typicalité, en fonction du nombre d'attributs caractéristiques qu'ils possèdent. Dans cette perspective, le « prototype » de chaque figure est défini par le nombre et de l'orientation des axes de symétrie et, des rapports de longueurs entre les côtés et de l'orientation du plus grand côté. Le carré posé sur sa base serait l'exemplaire prototypique de la figure « carré ». Le rectangle, avec les longueurs une fois et demie plus longues que les largeurs et un grand côté parallèle au plan vertical du sujet serait l'exemplaire prototypique de la figure « rectangle ». Le triangle équilatéral posé sur un côté serait le prototype du « triangle ». Ainsi, notre troisième hypothèse est que la reconnaissance des exemplaires prototypiques de chaque figure est nettement meilleure que celle des autres exemplaires de la même figure.

Pour tester ces hypothèses, nous avons proposé à 44 enfants scolarisés en grande section de maternelle quatre tests de reconnaissance d'une figure cible (cercle, carré, rectangle et triangle) parmi un ensemble de figures distractrices (Pinet & Gentaz, 2007). L'analyse des bonnes reconnaissances montre que la reconnaissance correcte des figures dépend en partie de leur nombre d'axes de symétrie avec une meilleure reconnaissance pour les cercles, puis pour les carrés, puis pour les rectangles et enfin pour les triangles. Ces résultats sont proches de ceux obtenus par Clements *et al.* (1999) avec des enfants âgés en moyenne de 5 ans. De plus, nos résultats montrent pour le carré, le rectangle et le triangle, que la

reconnaissance de l'exemplaire prototypique est meilleure que celle des exemplaires non prototypiques. Ces données valident nos deux premières hypothèses. Il ressort que l'exemplaire de chaque catégorie de figure que nous avons considéré comme étant le prototype est effectivement l'exemplaire le plus représentatif de chaque catégorie. Ces résultats valident ainsi la définition du prototype qui intègre des caractéristiques spatiales et géométriques (rapport entre les côtés et axe de symétrie vertical).

Cette étude suggère que les enfants de grande section de maternelle (5/6 ans) commencent à être capables de se représenter les principales figures géométriques élémentaires, mais avec des niveaux qui diffèrent selon la catégorie et l'exemplaire considéré. En d'autres termes, toutes les figures ainsi que tous les exemplaires d'une même figure ne sont pas reconnus de façon équivalente. La seconde expérience examine si l'ajout de la modalité haptique dans un entraînement destiné à préparer l'apprentissage de la géométrie permettrait aux enfants de mieux se représenter ces figures planes élémentaires.

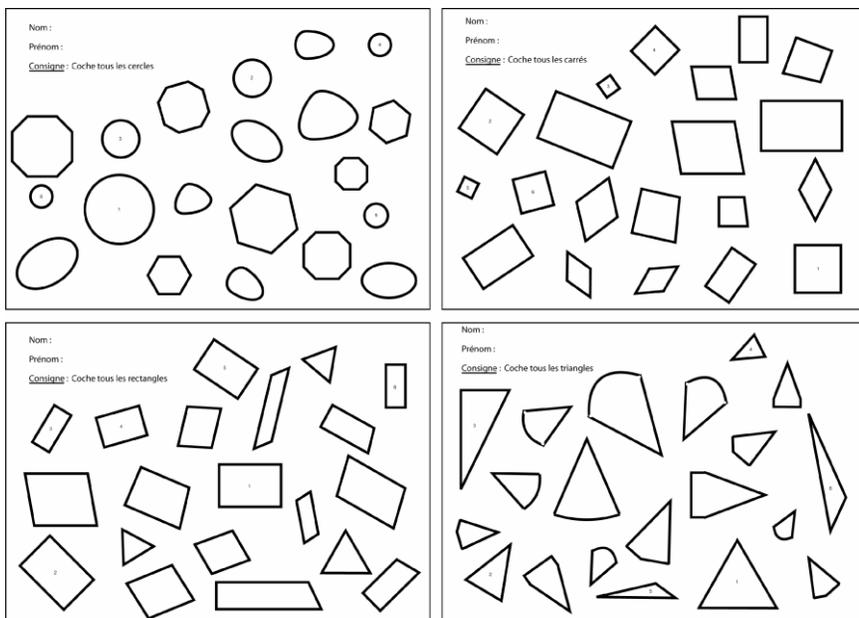


Figure 5 — Les feuilles tests proposées aux enfants

4.2. L'entraînement visuo-haptique

Comment favoriser l'apprentissage des figures géométriques élémentaires ? Peu de recherches ont évalué les effets de différents types d'entraînements destinés à favoriser l'apprentissage de la géométrie. Une étude ancienne de Prigge (1978) montre l'aide apportée aux enfants par l'introduction de la manipulation. Ainsi, 146 élèves de 5 ans sont assignés à un des trois programmes d'apprentissage des concepts géométriques: activités sans manipulation (test papier-crayon), activités avec manipulation en 2D (pliage de papier...), activités avec manipulation en 3D (solides de formes géométriques). Les performances ont été mesurées avant et

après les dix jours d'activités. Les résultats indiquent que les enfants apprennent mieux les concepts géométriques lorsque des solides géométriques sont disponibles pour chaque élève durant les activités proposées, ceci étant d'autant plus vrai que les élèves ont un niveau de connaissances initial faible. Comme pour les expériences précédentes, nous faisons l'hypothèse que les caractéristiques de la modalité haptique (traitement analytique et/ou double codage) pourraient également aider les jeunes enfants à traiter de manière plus efficace les caractéristiques des figures géométriques. Ainsi, cette modalité pourrait aider les enfants à traiter de la même manière les exemplaires d'une catégorie et donc à dépasser leurs spécificités au profit de leur généralité. En d'autres termes, l'introduction de l'exploration visuo-haptique dans le travail sur la reconnaissance des figures élémentaires, compte tenu des caractéristiques spécifiques du système haptique, devrait avoir des effets bénéfiques sur leur reconnaissance. L'objectif de cette seconde expérience est d'évaluer chez les enfants de grande section de maternelle les effets de l'introduction de la modalité haptique dans un entraînement destiné à préparer l'apprentissage de la géométrie (Pinet & Gentaz, 2008). Nous formulons l'hypothèse générale selon laquelle l'introduction de la modalité haptique, dans les exercices de reconnaissance des figures et d'utilisation du vocabulaire approprié, aiderait les enfants à mieux se représenter les figures planes élémentaires grâce à son traitement analytique et/ou à son double codage (visuel et moteur). Pour tester cette hypothèse, nous avons proposé deux types d'entraînements (17 enfants par groupe) respectivement dénommés « Visuel (V) » et « Visuo-Haptique (VH) » qui se différencient uniquement par les modalités sensorielles sollicitées. Ainsi, alors que l'entraînement V sollicite uniquement la modalité visuelle, l'entraînement VH sollicite les modalités visuelle et haptique. Ces deux entraînements ont en commun de proposer des exercices sur la connaissance des figures géométriques planes élémentaires (cercle, carré, rectangle et triangle) et de leurs propriétés. Cependant, ce travail repose sur une exploration uniquement visuelle dans l'entraînement V alors qu'il repose sur une exploration visuo-haptique dans l'entraînement VH. Si notre hypothèse est valide nous devrions observer une amélioration des performances après les entraînements V et VH, mais avec une amplitude plus importante après l'entraînement VH. Les deux entraînements se déroulent donc de la même manière et seuls les supports d'apprentissages diffèrent entre les deux types d'entraînements. L'entraînement V est réalisé avec des figures imprimées sur papier couleur et l'entraînement VH est réalisé avec des figures en relief découpées dans de la mousse.

Voici pour exemple, une description détaillée d'une séance qui porte sur le triangle. Dans l'exercice 1, chaque enfant découvre et explore un grand triangle, orienté aléatoirement, l'objectif étant de valider son nom (catégorie) et ses caractéristiques (propriétés). Dans le groupe d'entraînement V, les enfants sont invités à regarder attentivement la figure alors que dans le groupe d'entraînement VH, ils doivent regarder et toucher globalement la figure puis suivre plusieurs fois son contour avec leur index. L'expérimentateur propose ensuite un jeu avec de grandes figures (exercice 2), faces cachées avec un grand triangle référent qui reste au centre de la table. Parmi un ensemble de vingt-deux figures comprenant 6 triangles et 16 figures distrayantes, chaque enfant en sélectionne une et la garde face cachée près de lui. L'un après l'autre, chaque enfant retourne et découvre sa grande figure. Après réflexion, il décide s'il s'agit d'un triangle ou non. L'enfant essaye aussi de justifier son choix puis valide sa réponse en demandant l'avis au reste du groupe. Une fois que les mouvements d'exploration des grandes figures sont bien maîtrisés par les enfants, l'expérimentateur propose à chaque enfant de découvrir et d'explorer un petit triangle. Puis, l'expérimentateur pose au centre de la table, un grand et un petit

triangle pour valider au sein du groupe le concept de triangle en rappelant ses propriétés, ceci malgré des changements de taille, de couleur et d'orientation qui peuvent intervenir (exercice 3). Puis, l'expérimentateur propose un grand jeu de pioche avec toutes les petites et grandes figures (exercice 4), faces visibles au centre de la table. L'un après l'autre, chaque enfant doit trouver un exemplaire de triangle parmi d'autres figures distractrices. L'enfant fait son choix, le justifie, le valide ou le corrige éventuellement avec le reste du groupe. Si sa réponse est acceptée, il conserve le triangle sinon il remet la figure sur la table. Le jeu se termine lorsque tous les exemplaires de triangles ont été trouvés et que tous les enfants sont d'accord. Dans cet exercice, la difficulté est plus importante car les figures sont plus nombreuses, la taille et la couleur varie, ce qui demande une discrimination plus fine. Enfin, l'expérimentateur propose une tâche de classification des figures distractrices restantes (Exercice 5). Un enfant choisit une figure distractrice, la décrit aux autres élèves pour qu'ils puissent lui donner tous les exemplaires de cette figure afin de les ranger.

L'analyse des bonnes reconnaissances des figures cibles montre que seul l'entraînement VH permet aux enfants de mieux reconnaître les figures cibles après les séances d'entraînement. Ces résultats sont compatibles avec notre troisième hypothèse selon laquelle l'ajout de la modalité haptique dans un entraînement destiné à préparer l'apprentissage de la géométrie s'avère bénéfique en améliorant le nombre de reconnaissances correctes et en diminuant le nombre d'erreurs. Ces résultats sont cohérents avec les études qui montrent que l'utilisation de la manipulation facilite la construction de représentations efficaces des concepts géométriques que ce soit avec de jeunes enfants (Prigge, 1978) ou des plus âgés. Néanmoins, des études complémentaires à plus grande échelle sont nécessaires pour valider définitivement les apports bénéfiques de cet entraînement VH.

En conclusion, le premier résultat montre que les quatre catégories de figures (cercle, carré, rectangle et triangle) ne sont pas reconnues avec le même niveau de précision. Cette modulation des performances semble liée au nombre d'axes de symétrie de chaque catégorie, instaurant ainsi une hiérarchie allant du cercle (la figure la mieux reconnue), au carré, au rectangle et enfin au triangle (la figure la moins bien reconnue). Le second résultat indique que tous les exemplaires d'une même catégorie ne sont pas reconnus aussi aisément. Ainsi, comme le souligne Neisser (1987), chaque catégorie aurait un exemplaire prototypique, c'est-à-dire le plus représentatif de la catégorie. Cet exemplaire prototypique semble être caractérisé spatialement (axe de symétrie vertical) et géométriquement (rapport entre les longueurs des côtés). À la vue de ces résultats et à la lumière du modèle de van Hiele, les enfants de grande section de maternelle se situeraient au premier niveau de pensée géométrique (visualisation). Ils sont capables de reconnaître les prototypes visuels de chaque figure sans utiliser explicitement leurs propriétés. Ce niveau ne semble pas facile à dépasser car Shaughnessy et Burger (1985) ont montré que plus de 70% des élèves entrant au lycée sont au niveau 1, et que seuls les étudiants qui parviendront à atteindre le niveau 2 auront une chance d'arriver ultérieurement à justifier leur raisonnement. Dès lors, il apparaît évident que la mise en place d'entraînements destinés à favoriser ces apprentissages doit être encouragée afin d'aider les élèves à atteindre un niveau de raisonnement géométrique plus élevé avant de commencer l'étude de la géométrie reposant sur l'élaboration de démonstrations.

Les résultats montrent aussi que seuls les enfants ayant exploré manuellement les figures ont amélioré leur reconnaissance des figures géométriques, avec davantage

d'exemplaires reconnus et moins d'erreurs commises à l'issue de l'entraînement VH. Ces effets bénéfiques s'expliquent probablement par les caractéristiques fonctionnelles de la modalité haptique manuelle décrites précédemment. En effet, percevoir manuellement une figure implique un traitement plus analytique de l'information, contrairement à la modalité visuelle impliquant un traitement plus global. De plus, il semble qu'à l'âge de 5 ans, la modalité haptique permet une bonne discrimination des formes et des orientations. Ainsi, au-delà d'une simple image mentale prototypique visuelle, l'exploration haptique, permettrait à l'enfant de porter plus particulièrement son attention sur la structure même de ces figures et ses propriétés.

En résumé, l'ensemble de ces premiers résultats permet de confirmer que même si des connaissances géométriques existent chez les jeunes enfants, un apprentissage explicite incluant la modalité haptique est bénéfique en permettant d'augmenter la flexibilité de leurs représentations mentales et la précision de chaque catégorie.

5. Discussion générale

L'ensemble des recherches montre que l'ajout de la modalité haptique manuelle dans des entraînements scolaires classiques destinés à l'apprentissage de la lecture, l'écriture et la géométrie peut améliorer leur efficacité. Ainsi, plusieurs recherches montrent que l'exploration visuo-haptique et haptique des lettres et des figures géométriques en relief peut favoriser la mémorisation de la lettre et/ou de sa connexion au son correspondant et la reconnaissance visuelle des figures géométriques élémentaires. Comme nous l'avons montré dans chaque cas, ces effets bénéfiques peuvent s'expliquer par une ou plusieurs des trois caractéristiques fonctionnelles de la modalité haptique des enfants de 5 ans décrites plus haut.

Voyons pour terminer si des travaux en imagerie cérébrale fonctionnelle et en neuropsychologie permettent de mieux comprendre ces effets bénéfiques. Ainsi, Chao et Martin (2000) ont montré que la présentation visuelle d'objets qui sont associés à une action spécifique, active une zone dans le cortex prémoteur, même si aucune réponse motrice n'est requise. La connaissance sensorimotrice des propriétés fonctionnelles des objets manipulables serait une partie intégrante de leur représentation, et pourrait être utilisée pour les reconnaître. Bien que les lettres ne soient pas des objets manipulables, des liens entre perception et action pourraient contribuer à leur représentation, puisqu'elles sont associées à des mouvements spécifiques d'écriture. C'est ce que montre l'étude en IRMf de Longcamp, Anton, Roth, et Velay (2003). Les sujets avaient pour tâche de regarder des lettres et des pseudo-lettres. Les résultats montrent que la présentation visuelle de lettres mais pas celle de pseudo-lettres, active une zone dans le cortex prémoteur gauche, alors qu'aucune réponse motrice n'est requise. Cette zone est activée à la fois pour la vision de la lettre et pour son écriture. Reconnaître les lettres est généralement perçu comme étant un processus purement visuel, pourtant, nous possédons également une représentation sensorimotrice des lettres puisque nous avons aussi appris à les écrire. La représentation des lettres reposerait sur un réseau plurimodal dont l'une des composantes serait de nature sensorimotrice. Ce réseau se mettrait en place pendant l'apprentissage simultané de la lecture/écriture. La forme visuelle de la lettre, le son qui lui est associé, ainsi que le programme moteur utilisé pour l'écrire et les feedback kinesthésiques associés se lieraient pendant l'apprentissage de la lecture et de l'écriture, de manière à ce qu'une représentation multimodale des lettres

soit créée. Ces résultats mettent en évidence l'existence d'interactions perceptives et motrices dans la lecture.

En neuropsychologie, Seki (1995) a évalué les effets de la lecture kinesthésique (lire en traçant les contours des lettres avec les doigts et en copiant les lettres) chez deux patients japonais devenus alexiques consécutivement à une lésion cérébrale. Ces patients présentent des troubles importants de la lecture (lecture très lente, lettre à lettre), alors que l'écriture de mots est préservée. Cette méthode de « facilitation kinesthésique » a permis d'améliorer de manière significative la lecture des idéogrammes appris avec cette méthode, en comparaison d'une série d'idéogrammes contrôles (non appris avec la facilitation kinesthésique). Dans le même sens, Bartolomeo, Bachoud-Lévi, Chokron, et Degos (2002) ont également utilisé la méthode de facilitation kinesthésique chez un patient alexique. Ce patient présentait des difficultés importantes de lecture et d'imagerie mentale pour les lettres et les mots. Ses performances dans les tests d'imagerie mentale et de reconnaissance de lettres, extrêmement faibles, peuvent néanmoins être améliorées si on lui permet de tracer chaque lettre avec son doigt. Cette dissociation présentée par le patient, trouble de l'imagerie mentale et capacités motrices préservées pour les lettres, suggère que des codes séparés basés sur l'apparence visuelle et sur le programme moteur pourraient être utilisés pour accéder à la connaissance de la forme visuelle des lettres et des mots.

En conclusion, l'ensemble des données suggère que les lettres ou les figures seraient représentées en mémoire non seulement par leurs composantes visuelle et sonore mais également par leur forme sensorimotrice. Les mouvements d'écriture permettraient d'activer la représentation visuelle des lettres et de manière réciproque, le fait de simplement voir une lettre activerait la représentation sensorimotrice correspondante. De la même manière pour les figures, un entraînement visuo-haptique pourrait favoriser une représentation sensorimotrice des figures. Cette représentation intermodale des lettres et des figures se construirait lors des apprentissages scolaires et serait développée avec l'ajout de la modalité haptique.

Références bibliographiques

- Bara, F. et Gentaz, E. (2007). Apprendre à écrire. *Médecine & Enfance*, 27, 206-210.
- Bara, F., Gentaz, E., et Colé, P. (2004). Les effets des entraînements phonologiques et multisensoriels destinés à favoriser l'apprentissage de la lecture chez les jeunes enfants. *Enfance*, 4, 387-403.
- Bara, F., Gentaz, E., et Colé, P. (2007). The visuo-haptic and haptic exploration increases the decoding level of children coming from low-socioeconomic status families. *British Journal of Developmental Psychology*, 25, 643-663.
- Bara, F., Colé P. & Gentaz, E. (2008). Littératie précoce et apprentissage de la lecture : comparaison entre des enfants à risque, scolarisés en France dans des réseaux d'éducation prioritaire et des enfants de classes régulières. *Revue des Sciences de l'Éducation*, 34, 27-45.
- Bara, F., Gentaz, E., Sprenger-Charolles, et Colé, P. (2004). The visuo-haptic and haptic exploration of letters increases the kindergarten-children's reading acquisition. *Cognitive Development*, 19, 433-449.

- Bartolomeo, P., Bachoud-Lévi, A. C., Chokron, S., et Degos, J. D. (2002). Visually and motor based knowledge of letters: evidence from a pure alexic patient. *Neuropsychologia*, 40, 1363-1371.
- Baud-Bovy, G., et Gentaz, E. (2004). The visual localisation of the center of triangles in young children and adults. *Current Psychology Letters (Revue électronique)*.
- Baud-Bovy, G., et Soechting, J. F. (2001). The visual localization of the center of mass of compact asymmetric two-dimensional shapes. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27, 692-706.
- Berger, C., et Hatwell, Y. (1993). Dimensional and overall similarity classifications in haptics: A developmental study. *Cognitive Development*, 8, 495-516.
- Berger, C., et Hatwell, Y. (1995). Development of analytic vs. global processing in haptics: The perceptual and decisional determinants of classification skills. *British Journal of Developmental Psychology*, 13, 143-162.
- Berger, C., et Hatwell, Y. (1996). Developmental trends in haptic and visual free classifications: Influence of stimulus structure and exploration on decisional processes. *Journal of Experimental Child Psychology*, 63, 447-465.
- Berninger, V. W., Graham, S., Vaughan, K. B., Abbott, R. D., Abbott, S. P., Woodruff Rogan, L. W., et al. (1997). Treatment of handwriting problems in beginning writers: Transfert from handwriting to composition. *Journal of Educational Research*, 89, 652-666.
- Bigelow, A. (1991). Spatial mapping of familiar locations by blind children. *Journal of Visual Impairment and Blindness*, 85, 113-117.
- Bornstein, M., et Stiles-Davis, J. (1984). Discrimination and memory for symmetry in young children. *Developmental Psychology*, 20, 637-649.
- Bourdin, B., et Fayol, M. (2000). Is graphic activity cognitively costly? A developmental approach. *Reading and Writing*, 13, 183-196.
- Breznitz, Z. (2002). Asynchrony of visuo-orthographic and auditory-phonological word recognition process: An underlying factor in dyslexia. *Reading and Writing*, 12, 15-42.
- Bryant, P., et Bradley, L. (1985). *Children's reading problems : Psychology and education*. Oxford, Oxfordshire ; New York, NY: Blackwell.
- Bus, A. G., et Van Ijzendoorn, M. H. (1999). Phonological awareness and early reading : A meta-analysis of experimental training studies. *Journal of Educational Psychology*, 91, 403-414.
- Bushnell, E. W., et Baxt, C. (1999). Children's haptic and cross-modal recognition with familiar and unfamiliar objects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25, 1867-1881.
- Byrne, B., et Fielding-Barnsley, R. (1989). Phonemic awareness and letter knowledge in child's acquisition of the alphabetic principle. *Journal of Educational Psychology*, 81, 313-321.
- Byrne, B., et Fielding-Barnsley, R. (1990). Acquiring the alphabetic principle: A case for teaching recognition of phoneme identity. *Journal of Educational Psychology*, 82, 805-812.

- Byrne, B., et Fielding-Barnsley, R. (1991). Evaluation of a program to teach phonemic awareness to young children. *Journal of Educational Psychology*, 83, 451-455.
- Chao, L. L., et Martin, A. (2000). Representation of manipulable man-made objects in the dorsal stream. *Neuroimage*, 12, 478-484.
- 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*, 1, 43-64.
- Clements, D. H., et Battista, M. T. (1992). Geometry and spatial reasoning. In I. D. A. G. (Ed.). (Ed.), *Handbook of research in mathematics teaching and learning*. NY: Macmillan.
- Clements, D. H., Swaminathan, S., Hannibal, M. A., et Sarama, J. (1999). Young children's concepts of shape. *Journal for Research in Mathematics Education*, 30, 192-212.
- Dehaene, S. (2007). *Les neurones de la lecture*. Paris: Odile Jacob.
- Ehri, L. C., Nunes, S. R., Willows, D. M., Schuster, D. M., Yaghoub-Zadeh, Z., et Shanahan, T. (2001). Phonemic awareness instruction helps children learn to read: Evidence from the National reading Panel's meta-analysis. *Reading Research Quarterly*, 36, 250-287.
- Ernst, M. O., et Banks, M. S. (2002). Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, 415, 429-433.
- Fernald, G. (1943). *Remedial Techniques in Basic School Subjects*. New-York: McGraw-Hill.
- Fisher, C., Ferdinansen, K., et Bornstein, M. (1981). The role of symmetry in infant form discrimination. *Child Development*, 52, 457-462.
- Freides, D. (1974). Human information processing and sensory modality: Crossmodal functions, information complexity, memory and deficit. *Psychological Bulletin*, 81, 284-310.
- Garner, W. R. (1974). *The processing of information and structure*. Potomac, MD: L. Erlbaum.
- Gentaz, E. (2009). *La main, le cerveau et le toucher. Approche neurocognitive du sens haptique et des apprentissages*. Paris: Dunod.
- Gentaz, E., Colé, P., et Bara, F. (2003). Evaluation d'entraînements multisensoriels de préparation à la lecture chez les jeunes enfants de grande section maternelle: étude sur la contribution du système haptique manuel. *L'Année Psychologique*, 104, 561-584.
- Goodnow, J. J., et Levine, R. A. (1973). "The grammar of action ": Sequence and syntax in children's copying. *Cognitive Psychology*, 4, 82-98.
- Graham, S. (1990). The role of production factors in learning disabled students' compositions. *Journal of Educational Psychology*, 82, 781-791.
- Graham, S., Harris, K. R., et Fink, B. (2000). Is handwriting causally related to learning to write? Treatment of handwriting problems in beginning writers. *Journal of Educational Psychology*, 92, 620-633.

- Hatcher, P. J., Hulme, C., et Snowling, M. J. (2004). Explicit phoneme training combined with phonic reading instruction helps young children at risk of reading failure. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 45, 338-358.
- Hatwell, Y. (1986). *Toucher l'espace*. Lille: Presses Universitaires de Lille.
- Hatwell, Y., Streri, A., et Gentaz, E. (2000). *Toucher pour connaître*. Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle. Paris: PUF.
- Hatwell, Y., Streri, A., et Gentaz, E. (2003). *Touching for knowing*. Amsterdam/Philadelphia: John Benjamins Publishing Compagny.
- Hennion, B., Gentaz, E., Gouagout, P., et Bara, F. (2005). Telemaque, a new visuo-haptic interface for remediation of dysgraphic children. *IEEE, WorldHaptics*, 410-419.
- Hillairet de Boisferon, A., Bara, F., Gentaz, E., et Colé, P. (2007). Préparation à la lecture des jeunes enfants : Effets de l'exploration visuo-haptique des lettres et de la perception visuelle des mouvements d'écriture. *L'Année Psychologique*, 107, 537-564.
- Hulme, C. (1979). The interaction of visual and motor memory for graphic forms following tracing. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 31, 249-261.
- Hulme, C. (1981). *Reading retardation and multisensory teaching*. London: Routledge et Kegan Paul.
- Itard, J. (1800/1964). Mémoire et rapport sur Victor de l'Aveyron. In L. Malson (Ed.), *Les enfants sauvages* (pp. 119-246). Paris: Bibliothèque 10-18.
- Itakura, S., et Imamizu, H. (1994). An exploratory study of mirror-image shape discrimination in young children: Vision and touch. *Perceptual and Motor Skills*, 78, 83-88.
- Jongmans, M. J., Linthorst-Bakker, E., Westenberg, Y., et Smits-Engelsman, B. C. (2003). Use of a task-oriented self-instruction method to support children in primary school with poor handwriting quality and speed. *Human Movement Science*, 22, 549-566.
- Kirk, U. (1981). The development and use of rules in the acquisition of perceptual motor skills. *Child Development*, 52, 299-305.
- Klatzky, R. L., Lederman, S., et Reed, C. (1989). Haptic integration of object properties: Texture, hardness, and planar contour. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 15, 45-57.
- Lacquaniti, F., Terzuolo, C., et Viviani, P. (1983). The law relating the kinematic and figural aspects of drawing movements. *Acta Psychologica*, 54, 115-130.
- Lederman, S. J., et Klatzky, R. L. (1987). Hand movements: A window into haptic object recognition. *Cognitive Psychology*, 19, 342-368.
- Lederman, S. J., et Klatzky, R. L. (1993). Extracting object properties through haptic exploration. *Acta Psychologica*, 84, 29-40.
- Longcamp, M., Anton, J. L., Roth, M., et Velay, J. L. (2003). Visual presentation of single letters activates a premotor area involved in writing. *Neuroimage*, 19, 1492-1500.

- Longcamp, M., Zerbato-Poudou, M. T., et Velay, J. L. (2005). The influence of writing practice on letter recognition in preschool children: A comparison between handwriting and typing. *Acta Psychologica*, 119, 67-69.
- Louis-Dam, A., Kandel, S., et Orliaguet, J.-P. (2000). Anticipation motrice et anticipation perceptive. *Psychologie Française*, 45, 333-342.
- Lovell, K. (1959). A follow-up study of some aspects of the work of Piaget and Inhelder on the child's conception of space. *British Journal of Educational Psychology*, 29, 104-117.
- Lurçat, L. (1974). *Etudes de l'acte graphique*. Paris: Mouton.
- Martin, J. L. (1976). A test with selected topological properties of Piaget's hypothesis concerning the spatial representation of the young child. *Journal for Research in Mathematics Education*, 7, 26-38.
- Montessori, M. (1915). *The Montessori Method*. London: Heinemann.
- Montessori, M. (1958). *Pédagogie scientifique, la maison des enfants*. Alençon: Desclée de Brower.
- Morais, J. (1994). *L'art de lire*. Paris: Odile Jacob.
- Naka, M. (1998). Repeated writing facilitates children's memory for pseudocharacters and foreign letters. *Memory and Cognition*, 26, 804-809.
- Neisser, U. (1976). *Cognition and reality*. San Francisco: Freeman.
- O.N.L. (1998). *Apprendre à lire*. Paris: Odile Jacob.
- Ofman, W., et Shaevitz, M. (1963). The kinesthetic method in remedial reading. *Journal of Experimental Education*, 3, 317-320.
- Orliaguet, J. P. (1983). Reproduction de position de bras chez l'enfant en situation intramodale visuelle et proprioceptive. *Cahiers de Psychologie Cognitive*, 3, 133-146.
- Orliaguet, J. P. (1985). Dominance visuelle ou proprioceptive lors de la perception de la position d'un bras chez l'enfant. *Cahiers de Psychologie Cognitive*, 5, 609-618.
- Orliaguet, J. P., Kandel, S., et Boë, J.L. (1997). Visual perception of cursive handwriting: Influence of spatial and kinematic information on the anticipation of forthcoming letters. *Perception*, 26, 905-912.
- Orton, S. T. (1928). Specific reading disability - Strephosymbolia. *Journal of the American Medical Association*, 90, 1095-1099.
- Palluel-Germain, R., Bara, F., Hillairet de Boisferon, A., Hennion, B., Gouagout, P. & Gentaz, E. (2006). Early handwriting acquisition : Evaluation of Telemaque, a new visuo-haptic interface. *Proceedings of EuroHaptics*, 551-554.
- Palluel-Germain, R., Bara, F., Hillairet de Boisferon, A., Hennion, B., Gouagout, P. & Gentaz, E. (2007). A visuo-haptic device - Telemaque - increases the kindergarten children's handwriting acquisition. *IEEE WorldHaptics*, 72-77.
- Piaget, J., et Inhelder, B. (1947). *La représentation de l'espace chez l'enfant*. Paris: PUF.

- Pinet, L. & Gentaz, E. (2007). La reconnaissance de figures géométriques planes (cercle, carré, rectangle et triangle) chez des enfants de 5 ans. *Grand N*, 80, 17-24.
- Pinet, L. & Gentaz, E. (2008). Evaluation d'entraînements multisensoriels de préparation à la reconnaissance de figures géométriques planes chez les enfants de cinq ans : étude de la contribution du système haptique manuel. *Revue Française de Pédagogie*, 162, 29-44
- Pick, A. D., et Pick, H. L. (1966). A developmental study of tactual discrimination in blind and sighted children and adults. *Psychonomic Science*, 6, 367-368.
- Pick, H. L. (1974). Visual coding of non-visual spatial information. In R. B. MacLead et H. L. Pick (Eds.), *Perception*. Ithaca, NY: Cornell University Press.
- Power, R. P., et Graham, A. (1976). Dominance of touch by vision: Generalization of the hypothesis to a tactually experienced population. *Perception*, 5, 161-166.
- Préteur, Y., et Telleria-Jauregui, B. (1986). L'empan de copie comme un des indicateurs de l'acquisition de la langue écrite chez des enfants de 5-8 ans. *Psychologie Scolaire*, 56, 5-29.
- Prigge, G. R. (1978). The differential effects of the use of manipulative aids on the learning of geometric concepts by elementary school children. *Journal for Research in Mathematics Education*, 9, 361-367.
- Reed, C. L. (1994). Perceptual dependance for shape and texture during haptic processing. *Perception*, 23, 349-366.
- Reed, C. L., Lederman, S. J., et Klatzky, R. L. (1990). Haptic integration of planar size with hardness, texture, and planar contour. *Canadian Journal of Psychology*, 44, 522-545.
- Revesz, G. (1934). System der optischen und haptischen Raumtäuschungen. *Zeitschrift für Physiologie*, 131, 296-375.
- Revesz, G. (1950). *Psychology and Art of the Blind*. London: Longmans Green.
- Rock, I. (1983). *The Logic of Perception*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Rosch, E. (1973). Natural categories. *Cognitive Psychology*, 4, 328-350.
- Rosch, E., et Mervis, C. B. (1975). Family resemblances: Studies in the internal structure of categories. *Cognitive Psychology*, 7, 573-605.
- Royer, F. (1981). Detection of symmetry. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 7, 1186-1210.
- Scarborough, H. (1998). Predicting the future achievement of second graders with reading disabilities: Contribution of phonemic awareness, verbal memory, rapid naming and IQ. *Annals of Dyslexia*, 48, 115-136.
- Seki, K., Yajima, M. et Sugishita, M. (1995). The efficacy of kinesthetic reading treatment for pure alexia. *Neuropsychologia*, 33, 595-609.
- Smith, L. B. (1989). A model of perceptual classification in children and adults. *Psychological Review*, 7, 811-824.

- Smits-Engelsman, B. C., Niemeijer, A. S., et van Galen, G. P. (2001). Fine motor deficiencies in children diagnosed as DCD based on poor grapho-motor ability. *Human Movement Science, 20*, 161-182.
- Sprenger-Charolles, L., et Casalis, S. (1996). Lire. Lecture et écriture: acquisition et troubles du développement. Paris: P.U.F.
- Sprenger-Charolles, L., et Colé, P. (2003). *Lecture et dyslexie. Approche cognitive*. Paris: Dunod.
- Thompson, G. (1975). Discrimination of mirror-image shapes by young children. *Journal of Experimental Child Psychology, 19*, 165-176.
- van Hiele, P. M. (1986). *Structure and insight*. Orlando: Academic Press.
- Viviani, P. (1994). Les habiletés motrices. In M. Richelle, J. Requin & M. Robert (Eds), *TRaité de Psychologie Expérimentale 1* (pp. 778-857). Paris: PUF.
- Viviani, P. (2002). Motor competence in the perception of dynamic events. In W. Prinz et B. Hommel (Eds.), *Common mechanisms in perception and action: Attention and performance* (pp. 406-442). Oxford: Oxford University Press.
- Walsh, J. K. (1973). Effect of visual and tactual stimulation on learning abstract forms: A replication. *Bulletin of Psychonomic Science, 2*, 357-359.
- Zesiger, P. (1995). *Ecrire: Approche cognitive, neuropsychologique et développementale*. Paris: P.U.F.

Les auteurs

Edouard Gentaz est chercheur au CNRS affecté au Laboratoire de Psychologie et Neurocognition (LPNC) de Grenoble (UPMF). Il travaille actuellement sur les apports du toucher dans les apprentissages scolaires et les compétences précoces des nouveau-nés.

Florence Bara effectue actuellement un séjour post-doctoral à l'université de Sherbrook (Faculté de Psychologie et des Sciences de l'Éducation, Canada) après avoir soutenu au LPNC en 2005 son doctorat de psychologie cognitive sous la direction de Pascale Colé et Edouard Gentaz.

Richard Palluel-Germain effectue actuellement un séjour post-doctoral à l'université de Philadelphie (*Moss Rehabilitation Research Institute*, USA) après avoir soutenu son doctorat de psychologie cognitive au LPNC en 2004 sous la direction de J.P. Orliaguet.

Laetitia Pinet prépare actuellement un doctorat de psychologie cognitive au LPNC sous la direction d'Edouard Gentaz.

Anne Hillairet de Boisferon prépare actuellement un doctorat de psychologie cognitive au LPNC sous la direction de Pascale Colé et d'Edouard Gentaz.