

## TROUBLES D'ÉCRITURE ET DYSLEXIE : REVUE THÉORIQUE, ASPECTS CLINIQUES ET APPROCHE EXPÉRIMENTALE

[Florence Brun-Henin](#), [Jean-Luc Velay](#), [Yaël Beecham](#), [Sophie Cariou](#)

De Boeck Supérieur | « [Développements](#) »

2012/4 n° 13 | pages 4 à 28

ISSN 2103-2874

ISBN 9782353272259

Article disponible en ligne à l'adresse :

-----  
<https://www.cairn.info/revue-developpements-2012-4-page-4.htm>  
-----

Distribution électronique Cairn.info pour De Boeck Supérieur.

© De Boeck Supérieur. Tous droits réservés pour tous pays.

La reproduction ou représentation de cet article, notamment par photocopie, n'est autorisée que dans les limites des conditions générales d'utilisation du site ou, le cas échéant, des conditions générales de la licence souscrite par votre établissement. Toute autre reproduction ou représentation, en tout ou partie, sous quelque forme et de quelque manière que ce soit, est interdite sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, en dehors des cas prévus par la législation en vigueur en France. Il est précisé que son stockage dans une base de données est également interdit.

# Troubles d'écriture et dyslexie : revue théorique, aspects cliniques et approche expérimentale

## Résumé

L'association fréquente à la dyslexie de troubles d'écriture voire d'une dysgraphie périphérique, ou d'autres comorbidités comme le TAC ou le TDAH est observée de longue date et amène à soulever la question d'une étiologie neurobiologique commune pouvant expliquer la co-occurrence de ces troubles chez un même sujet. Plusieurs hypothèses ont été évoquées dans ce sens, en particulier la théorie motrice de la dyslexie ou théorie cérébelleuse et plus récemment la théorie du déficit de l'apprentissage procédural, qui suggère l'atteinte des réseaux neuronaux impliqués dans la mémoire procédurale pour le langage et pour la motricité. Le retentissement de ces comorbidités sur la vie scolaire et l'avenir socioprofessionnel des sujets dyslexiques justifie une approche pluridisciplinaire pour mieux les reconnaître et les prendre en charge. Les recherches expérimentales portant sur l'étude des variables spatio-temporelles de l'écriture par l'enregistrement digitalisé sur tablette graphique permettent de mieux appréhender les processus en cause dans les troubles d'écriture, notamment dans la dyslexie.

## Mots clés

- dyslexie
- dysgraphie périphérique
- comorbidités
- apprentissage procédural
- tablette graphique

Florence BRUN-HENIN<sup>1</sup>

Jean-Luc VELAY<sup>2</sup>

Yaël BEECHAM<sup>3</sup>

Sophie CARIOU<sup>4</sup>

1. Centre de références des troubles d'apprentissages – Service de neuropédiatrie – CHU Timone, Marseille

2. Laboratoire de neurosciences cognitives, UMR CNRS 7291, Aix-Marseille Université, Centre Saint-Charles, Marseille

3. École d'orthophonie de Marseille, université de la Méditerranée, Marseille

4. École d'orthophonie de Marseille, université de la Méditerranée, Marseille

## Summary

This is a longstanding knowledge that dyslexia is often linked to poor handwriting, peripheral dysgraphia or other comorbidities such as ADHD or DCD. Many studies were achieved to try to find a common neural substratum for developmental disorders and recently a cerebellar deficit and a deficit in procedural learning neural systems have been proposed. Comorbidities affect in an overwhelming way academic performance in school and heavily impact future adult life. A multidisciplinary approach is required to make diagnosis and to establish appropriate remediations. A digitizer-based evaluation of the handwriting process may improve our understanding of writing difficulties, in particular in dyslexic children.

## Keywords

- dyslexia
- peripheral dysgraphia
- comorbidities
- procedural learning
- digitizer

## INTRODUCTION

Dans cet article, nous nous proposons de faire un point sur l'état des connaissances et des recherches dans le domaine des relations entre troubles de la lecture et de l'écriture. Les troubles conjoints de l'écriture et de la lecture nous paraissent pertinents pour mieux comprendre l'hétérogénéité souvent observée des troubles cognitifs et pour aborder la problématique des comorbidités. L'utilisation des tablettes graphiques a permis un progrès dans la compréhension des processus sous-jacents au geste d'écriture ainsi que dans l'élaboration des hypothèses quant aux causes des dysgraphies. Nous tenterons par ailleurs de mieux définir le terme même de dysgraphie et de plaider en faveur de l'utilisation d'une terminologie plus précise dans le domaine de la pratique clinique. Nous évoquerons dans un premier temps la définition de la dyslexie, puis dans un deuxième temps, nous aborderons les troubles de l'écriture et la problématique des dysgraphies. Ces rappels nous paraissent nécessaires pour une meilleure compréhension du cheminement vers les théories actuelles. Ensuite, nous discuterons des liens possibles entre dyslexie et troubles de l'écriture. Dans une dernière partie enfin, nous exposerons une recherche récente que nous avons conduite sur cette question.

## La dyslexie

### **Définition**

La dyslexie est un trouble spécifique des apprentissages qui se manifeste comme une difficulté à apprendre à lire chez un enfant malgré un enseignement adapté, une intelligence adéquate et un bon environnement socio-éducatif (Habib, 2002 ; Stoodley et Stein, 2011). La notion de trouble spécifique des apprentissages suppose que cette difficulté ne peut être attribuée ni à un retard intellectuel, ni à un handicap sensoriel, ni à des conditions défavorables de l'environnement. En pratique clinique, ce diagnostic ne peut être posé chez un enfant donné, qu'au moyen de tests standardisés de lecture et d'orthographe qui sont réalisés de façon répétées sur plusieurs années d'apprentissage du langage écrit et de suivi. La dyslexie est le trouble des apprentissages le plus connu et le mieux exploré ; elle concerne entre 8 et 10 % d'enfants vers l'âge de 10 ans (rapport INSERM, 2007). Si l'on considère une définition de référence comme celle de la CIM-10, on constate que la question du trouble d'écriture sous-jacente à celle du trouble du langage écrit n'est pas

abordée de façon explicite ; seuls sont envisagés le trouble de lecture et le trouble orthographique, le deuxième étant la conséquence du premier. Or, lors de l'apprentissage chez le sujet normal, lecture, écriture et orthographe apparaissent interdépendantes (Berninger 2008).

### **Critères diagnostiques du trouble spécifique de la lecture selon la CIM-10**

Un trouble spécifique de la lecture est décelé en présence d'au moins l'un des deux critères suivants :

- 1) La note obtenue à une épreuve standardisée d'exactitude ou de compréhension de la lecture se situe à au moins deux écarts-types au-dessous du niveau escompté, compte tenu de l'âge chronologique et de l'intelligence générale de l'enfant ; l'évaluation des performances en lecture et du QI doit être menée à l'aide de tests administrés individuellement et standardisés en fonction de la culture et du système scolaire de l'enfant.
- 2) Antécédents de difficultés sévères en lecture ou de résultats de tests ayant répondu au critère 1 à un âge antérieur ; en outre, le résultat obtenu à un test d'orthographe se situe à au moins deux écarts-types au-dessous du niveau escompté, compte tenu de l'âge chronologique et du QI.

## **Les origines de la dyslexie**

Plusieurs hypothèses sont évoquées à l'origine de la dyslexie développementale qui apparaît dans la pratique clinique comme un trouble assez hétérogène, tant au plan de la forme que du degré de sévérité.

### **La théorie phonologique**

Cette hypothèse largement étayée par des travaux expérimentaux, apparaît à l'heure actuelle comme la plus solide. Elle repose sur le fait que la lecture est une activité langagière, qui nécessite le décodage des correspondances graphèmes-phonèmes, lequel est relié aux compétences d'analyse et de mémoire phonologiques (procédure sub-lexicale). Un déficit de la procédure phonologique a été retrouvé de façon convergente dans pratiquement toutes les études, y compris dans les comparaisons avec des enfants plus jeunes mais de même niveau de lecture (Ramus *et al.* 2003 ; 2006 ; Sprenger-Charolles, 2000). Cette hypothèse a été confortée par des études en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) qui montrent un déficit d'activation des régions péri-sylviennes gauches, normalement impliquées dans l'analyse phonologique et la mémoire de travail.

### **Les théories visuelles**

L'apprentissage de la lecture comporte également une dimension visuelle : le lecteur doit analyser visuellement la séquence du mot écrit et mettre en relation cette information visuelle avec l'information phonologique issue du traitement auditif de la séquence orale correspondante. La procédure lexicale, qui est une autre voie d'accès à la lecture, s'appuie sur la reconnaissance des mots (il faut préciser cependant qu'il ne s'agit pas d'une procédure reposant uniquement sur le code visuel des mots mais aussi sur leur code phonologique et sémantique). Elle s'appuie sur la connaissance orthographique des mots qui est mémorisée en mémoire à long terme sous la forme d'un stock orthographique. La mise en place de cette procédure dépend de l'efficacité de la procédure sub-lexicale ou phonologique.

Plusieurs profils de dyslexie développementale peuvent donc être observés : le déficit de la procédure sub-lexicale est pratiquement constant et peut s'associer ou non à un déficit de la procédure lexicale mais il est toujours plus sévère que ce dernier. L'hétérogénéité de la dyslexie tient aussi à la présence de troubles sensori-moteurs associés qui sont, souvent à tort, considérés comme secondaires, ainsi que de comorbidités telles qu'une dyscalculie un déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité (TADHA) un trouble d'acquisition des coordinations motrices (TAC) des troubles du langage oral et enfin une dysgraphie. Ces troubles associés, non rares, ont incité à rechercher depuis de nombreuses années, une explication neurobiologique commune pour tenter d'expliquer l'hétérogénéité des profils cognitifs observés chez les enfants porteurs de troubles des apprentissages.

L'hypothèse d'un déficit des traitements visuels, indépendamment de toute atteinte perceptive, a été évoquée sous l'hypothèse « magno-cellulaire » (Stein, 2001). Récemment, cette théorie a été étendue à l'audition et a évolué vers l'idée d'un trouble amodal des systèmes magno-cellulaires : les enfants dyslexiques auraient plus de mal à traiter les informations temporelles rapides dans l'une ou l'autre modalité, visuelle ou auditive, suite à l'atteinte conjointe des systèmes magno-cellulaires visuels et auditifs. Elle rendrait compte des formes de dyslexie mixte observées chez certains enfants. Cependant, elle a été remise en question pour des raisons méthodologiques et ne semble concerner qu'une sous-population d'enfants dyslexiques. L'hypothèse d'un trouble de l'attention visuelle a également été soulevée mais les déficits d'attention visuelle observés chez les dyslexiques (en dehors du contexte d'un trouble attentionnel général) sont le plus souvent associés à des troubles

phonologiques. Il faut signaler, cependant, l'existence d'une forme particulière de dyslexie développementale, liée à un trouble de l'empan visuo-attentionnel (nombre de lettres qui peuvent être traitées simultanément au sein de la séquence du mot lors de chaque fixation), qui pourrait être observée indépendamment de toute atteinte phonologique (Bosse, Tainturier, Valdois, 2007). Une étude récente confirme cette approche : les auteurs ont constaté qu'on peut rendre la lecture plus aisée en augmentant l'espace entre les lettres (Zorzi, PNAS, 2012).

### **La théorie du traitement temporel**

L'hypothèse d'un trouble du jugement d'ordre temporel (JOT) a été évoquée par Paula Tallal (1980) comme pouvant être à l'origine des troubles du langage oral et de la dyslexie. En effet, les enfants porteurs de ces troubles présentent des difficultés dans la gestion des aspects temporels liés à la réalisation des actes de la vie quotidienne, la perception et la conscience de la durée ou encore la discrimination d'événements brefs comme ceux constitutifs de la parole humaine. Le sujet dyslexique aurait ainsi du mal à traiter les stimuli de son environnement caractérisés par leur brièveté et leur succession rapide, comme le montre le test de répétition de Tallal. Des études plus récentes ont montré une corrélation significative de ce déficit avec le trouble phonologique, de même qu'une mesure de jugement de durée d'un stimulus auditif. Cette même théorie évoque également un déficit dans différentes modalités. Ainsi, le sujet dyslexique souffrirait d'un déficit du traitement temporel nécessitant la mise en commun d'informations provenant au cerveau par différentes modalités sensorielles (Tallal 1980 citée par Habib, 2002).

Comme nous venons de le voir, ces dernières théories tentent d'aborder de manière plus unificatrice la dyslexie afin d'expliquer l'hétérogénéité du tableau clinique ainsi que la présence de troubles associés.

## **La dysgraphie**

### **Apprentissage de l'écriture**

En France, de nos jours, l'apprentissage de l'écriture débute aux alentours de 4 ans (en moyenne section de maternelle). Il commence par l'écriture des lettres isolées en majuscules d'imprimerie (lettres « bâton ») puis graduellement portées sur les lettres cursives (attachées) avec une attention particulière à la liaison entre les lettres, pour aboutir à une écriture lisible et rapide (Zesiger, 1995,

2003). Ces deux critères : qualité de la production des formes des lettres et rapidité, sont importants pour la réussite de l'apprentissage. Ce dernier, qui dure jusqu'à environ l'âge de 10 ans, va permettre la retranscription écrite du langage. Car la maîtrise de l'écriture est aussi (et peut-être avant tout) celle de la langue écrite : il faut pouvoir prendre des notes et rédiger, ce qui suppose que l'écriture soit un acte automatisé, aussi bien sur le plan graphomoteur qu'orthographique (Berninger, 2008). On considère qu'il existe trois domaines d'acquisition (Zesiger, 1995, 2003) :

- les acquisitions visuo-spatiales ;
- les acquisitions des mouvements de l'écriture : l'apprentissage de ceux-ci comporte l'apprentissage conjoint des composantes morphocinétiques (programmes moteurs responsables de la production de toutes les formes d'une lettre) et des composantes topocinétiques (ensemble des mouvements permettant l'agencement spatial de la production écrite, variables selon les cultures et les systèmes d'écriture) ;
- l'acquisition de l'orthographe.

L'activité d'écriture est donc une activité cognitive complexe qui fait intervenir, à la fois des processus perceptivo-moteurs (comme l'analyse visuo-spatiale et l'intégration visuo-motrice), des processus moteurs (la coordination motrice-fine), ainsi que des processus cognitifs de haut niveau (attention, mémoire, capacités de planification et programmation, processus permettant l'apprentissage et l'automatisation) et, bien sûr, des processus linguistiques. Les modèles neuropsychologiques comme celui de Van Galen (1991), évoquent cet aspect multidimensionnel, sans pouvoir toutefois prendre en compte toutes ces composantes, en particulier l'intégration visuo-motrice, les facteurs visuo-spatiaux (Zesiger, 1995 ; Kaiser, 2009).

Nous allons dans un premier temps évoquer le concept de dysgraphie, puis les différentes origines possibles de celle-ci ; enfin, nous replacerons la problématique de la dysgraphie dans le contexte de la dyslexie et nous aborderons les hypothèses cognitives et neurobiologiques actuelles concernant les troubles d'apprentissage en général.

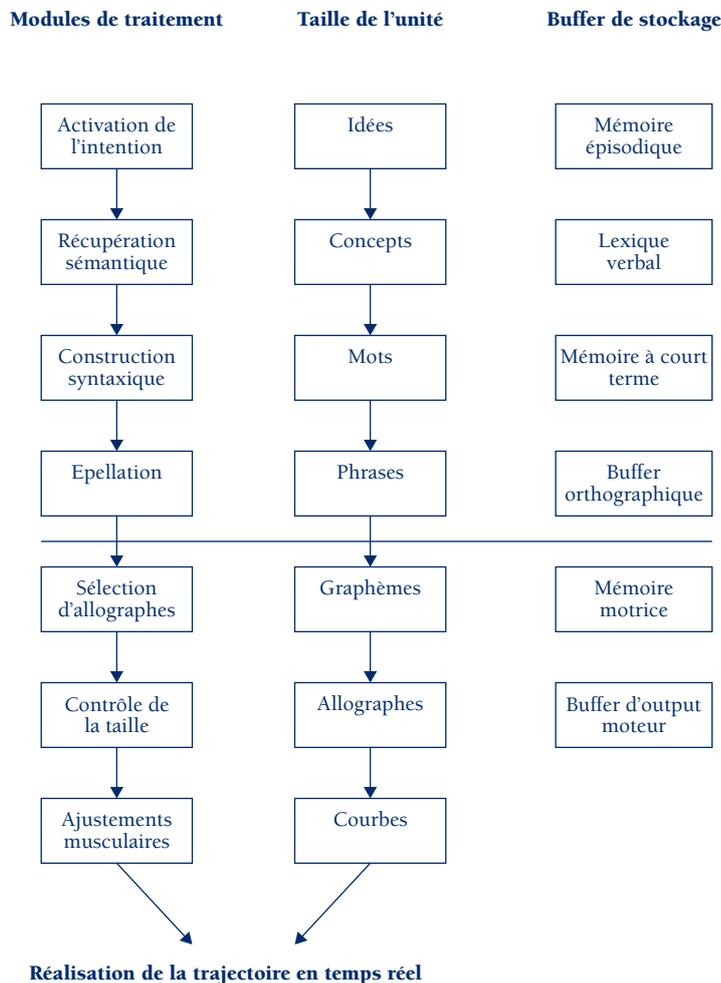


Figure 1. Modèle de l'écriture manuelle de Van Galen (1991) d'après Zesiger (1998).

## Définitions et incidence de la dysgraphie

Bien que le DSM IV mentionne un « trouble de l'expression écrite » parmi les « troubles des apprentissages », celui-ci concerne en fait le versant orthographique et syntaxique de l'écriture. Il renvoie l'écriture illisible au « trouble de l'acquisition des coordinations » sans plus de précisions. À l'inverse, Hamstra-Bletz et Blôte (1993) considèrent la dysgraphie comme « un trouble du langage écrit affectant les “composantes mécaniques de l'écriture”, intervenant chez un enfant d'intelligence normale, en l'absence de trouble neurologique ou de handicap perceptivo-moteur associé, possédant un niveau d'instruction correspond à ce qu'un enfant de cet âge est censé savoir ». Cette définition se rapproche plus de la pratique clinique, au cours de laquelle la dysgraphie se manifeste par une écriture illisible et/ou trop lente, compte tenu de l'âge de l'enfant et surtout de son niveau d'apprentissage. Pour parler de dysgraphie, il faut attendre l'âge de 7 ans, lorsque l'enfant commence à dépasser les difficultés techniques inhérentes à l'apprentissage de l'écriture. La dysgraphie est plus fréquente chez le garçon (3/1). Sa prévalence dans la population scolaire est variable selon les études, en fonction de l'âge, du type de scolarité ou des critères diagnostiques : elle se situerait en moyenne entre 6 et 8 % (Kaiser, 2009). Elle va constituer un handicap sérieux pour le reste de la scolarité de l'enfant et même pour sa vie d'adulte (choix d'un métier, insertion socio-professionnelle, cf. Berninger, 2008 ; Kirby, 2008).

## Caractéristiques cliniques

L'importance des perturbations est extrêmement variable selon les individus et peut aller de la simple perturbation de lettres à l'incapacité complète d'écrire. Gaddes et Edges (cités par Charles, 2003) proposent de regrouper les perturbations en quatre rubriques, associant à la fois les aspects moteurs, d'intégration spatiale ainsi qu'orthographiques :

- **altération de l'écriture** : tremblement, lettres mal formées, cabossages, télescopes ou absence de liaison, traits repassés, micrographie ;
- **troubles spatiaux** : mauvais alignement des lettres, mots serrés, absence de marges, lignes ascendantes ou descendantes ;
- **troubles syntaxiques** : difficultés à écrire des réponses grammaticalement correctes en réponse à des questions, alors que l'expression orale ne souffre pas de telles difficultés ;
- **répugnance à écrire**.

Encore une fois, sont confondus dans ces rubriques des aspects graphomoteurs et des difficultés linguistiques qui sont d'un autre ordre. En pratique clinique, les dysgraphies développementales revêtent des aspects très divers, associant de façon variable ces différents troubles. Comme nous l'avons déjà souligné, différents problèmes peuvent être à l'origine d'un trouble de l'écriture : difficultés d'origine perceptivo-motrice, difficultés d'orthographe (relevant d'un trouble phonologique associé ou non à un trouble lexical), difficultés avec la composition écrite (planification, choix des mots, construction de phrases, organisation du texte). Il est intéressant ici de signaler que, dans la terminologie anglo-saxonne, le terme de dysgraphie peut être utilisé indifféremment pour évoquer deux types très différents de troubles d'écriture (Nicolson, Fawcett, 2011) : d'une part, en référence aux troubles phonologiques et orthographiques observés chez les dyslexiques (*poor spelling*), d'autre part en termes de contrôle grapho-moteur ainsi que la définissent Hamstra-Bletz *et al.* (*poor handwriting*). Or il nous semble important d'utiliser une terminologie précise, les troubles observés et leurs conséquences étant très différents, de même que leurs remédiations. Gubbay et de Klerk (1995) proposent une classification des dysgraphies développementales inspirée de celle des dysgraphies acquises, en distinguant les dysgraphies aphasiques liées à un trouble du langage, les dysgraphies apraxiques (motrices ou visuo-constructives) et les dysgraphies mécaniques. Plus récemment, d'autres auteurs (Fournier del Castillo, 2010 ; Di Pietro, 2010), en référence aux pathologies acquises de l'adulte, parlent de dysgraphie centrale liée à un trouble orthographique (ou linguistique) et de dysgraphie périphérique liée à une atteinte, soit du stockage, soit de la sélection des allographes, ou soit encore de l'exécution des patterns graphomoteurs. Cette terminologie nous paraît plus précise et, sans doute, intéressante en ce qui concerne les dysgraphies développementales. Dans cet article, nous parlerons donc de la dysgraphie en tant que trouble graphomoteur, donc sans lien direct ou en tout cas apparent avec le trouble linguistique. Albaret *et al.* (2013) ont proposé le terme de « troubles de l'apprentissage de la graphomotricité » (TAG) pour qualifier la dysgraphie développementale. Ce terme présente le grand avantage de circonscrire et de préciser la notion trop générique de dysgraphie, dans laquelle sont souvent inclus d'autres troubles de l'écriture, en particulier la dysorthographe qui ne relève pas des mêmes processus cognitifs que les difficultés graphomotrices.

Le diagnostic de trouble d'écriture constitué va reposer sur une étude clinique au moyen d'un test graphométrique qui évalue les aspects morphocinétiques de l'écriture (échelle de dysgraphie d'Adjurriaguerra, 1964), échelle d'évaluation de l'écriture BHK (adaptation française par Charles, Soppelsa et Albaret, 2003). Un score supérieur à +2ET permet de porter le diagnostic de dysgraphie avérée mais, pour autant, un score entre +1 et +2ET témoignant d'une « écriture manuelle faible », semble également important à prendre en considération en raison de son retentissement sur la vie scolaire de l'enfant (Kaiser, 2009).

### Caractéristiques spatio-temporelles des dysgraphies

En termes de description clinique (et pas forcément à un niveau explicatif), les enfants dysgraphiques présentent le plus souvent un trouble perceptivo-moteur, en particulier, un trouble de la motricité fine, un trouble de la discrimination visuelle et un trouble de l'intégration visuo-motrice (Maeland, 1992 ; Smits-Engelmann, 1997 ; Volman *et al.*, 2007 ; Schoenmaker *et al.*, 2001), mais seul ce dernier semble corrélé à la qualité et à la vitesse d'écriture.

L'enregistrement digitalisé de l'écriture au moyen de tablettes graphiques permet une étude plus

objective des processus cognitifs impliqués dans l'écriture et ses troubles. L'étude des variables spatio-temporelles montre chez les enfants dysgraphiques, des mouvements plus rapides et plus amples que chez les normo-scripteurs (Van Dorn et Keuss, 1993), donc moins de précision graphomotrice. Ces résultats sont confirmés par Smits-Engelmann *et al.* (1997) qui montrent l'existence d'une difficulté à réguler les forces pour contraindre spatialement le geste (épreuves graphiques utilisant une contrainte de précision spatiale), ce qui évoque la présence d'un trouble du contrôle moteur à l'origine de la dysgraphie. Plus récemment, Rosenblum *et al.* (2003), étudiant les levers chez des enfants dysgraphiques, montrent que de nombreux mouvements du stylo en l'air se produisent pendant ces levers témoignant peut-être de la difficulté de programmation motrice des dysgraphiques. Dans une étude plus récente (2006), ce même auteur retrouve des différences significatives entre bons et mauvais scripteurs, en ce qui concerne le nombre de segments nécessaires aux liaisons inter-lettres, nombre de lettres et levers de stylo. Elle montre également une variabilité importante au plan spatial et temporel lors de la réalisation d'une même lettre à plusieurs reprises.

Il semble donc, au vu des résultats de ces différentes études, que les enfants dysgraphiques

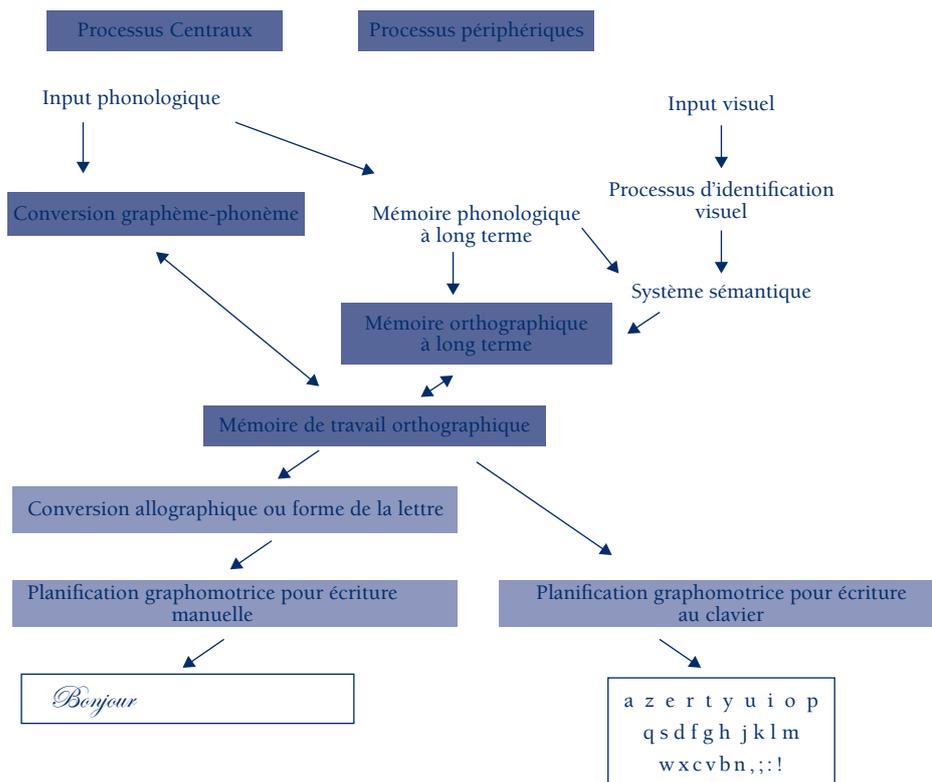


Figure 2. D'après Purcell J., Turkeltaub P. (2011) Examining the central and peripheral processes of written word production through met-analysis, *Frontiers in psychology*, 2 article 239.

présentent une grande variabilité spatiale et temporelle dans l'écriture, qui pourrait témoigner d'un trouble de la programmation motrice.

## Écriture et dyslexie

### **Problématique**

Les troubles d'écriture chez l'enfant dyslexique nous semblent avoir été encore peu étudiés. Le sujet dyslexique rencontre bien souvent des difficultés d'écriture qui sont extrêmement pénalisantes pour le cursus scolaire et universitaire. En plus de la dysorthographe, il présente fréquemment une lenteur d'écriture souvent associée à une mauvaise lisibilité. Les parents d'enfants dyslexiques signalent que l'apprentissage de l'écriture a été difficile, voire pénible. Une crispation est fréquemment observée au cours de l'acte d'écriture. Enfin, le sujet dyslexique adulte garde un trouble orthographique qui perdure de façon plus ou moins importante tout au long de sa vie et le gêne dans la production écrite, même pour rédiger des écrits simples comme un chèque bancaire. Dans ce contexte, l'écriture ne peut être utilisée comme un langage et comme un moyen de communication. Les troubles d'écriture apparaissent cependant encore souvent sous-estimés et insuffisamment pris en charge (Berninger, 2008). Cependant, l'association de troubles moteurs au trouble de lecture ainsi que l'utilisation d'outils comme l'IRMF ont permis de lancer un débat théorique sur une origine neurobiologique commune pour l'ensemble des troubles développementaux (Mather, 2003 ; Nicolson, 1992, 1996).

### **Les troubles d'écriture dans la dyslexie**

Une étude de Sovik (1987) compare les caractéristiques de l'écriture d'enfants dysgraphiques, dyslexiques et normoscripteurs. Il trouve des différences significatives dans la lisibilité entre les deux groupes d'enfants dyslexiques et dysgraphiques avec les enfants normo-scripteurs, mais plus marquées pour les sujets dysgraphiques. En ce qui concerne la vitesse d'écriture, les dyslexiques sont significativement moins performants, en particulier pour l'écriture de mots. Il ne retrouve pas de différence significative entre les trois groupes en ce qui concerne la durée des pauses et la vitesse maximale. Martlew (1992) étudie l'écriture d'enfants dyslexiques âgés en moyenne de 10 ans, dans des conditions différentes (copie et dictée) et compare la vitesse enregistrée avec celle d'enfants normolecteurs âgés

de 10 ans et 8 ans. En dehors du niveau orthographique plus faible comparé aux deux groupes témoins, les dyslexiques sont plus lents que les enfants de 8 ans dans la copie au tableau et l'écriture de mots complexes, mais ne diffèrent pas des enfants de 10 ans dans les tâches de copie. Leur vitesse d'écriture en dictée ainsi que leur niveau graphique (lisibilité) sont proches des résultats obtenus par les normolecteurs de 8 ans. L'auteur conclut que les enfants dyslexiques possèdent des patterns graphomoteurs automatisés mais mal construits à la fois dans la formation des lettres mais aussi dans l'orthographe. Dans une recherche plus récente, Berninger (2008) met l'accent sur la fréquence des troubles d'écriture chez le dyslexique mais souligne que ces troubles sont plus liés au trouble orthographique qu'à un trouble graphomoteur à proprement parler : Berninger relève en effet que les sujets dyslexiques ont un défaut d'automatisation du code verbal et du code écrit au cours d'épreuves de dénomination rapide orale et écrite, qui serait corrélé au trouble orthographique. En revanche, la planification graphomotrice apparaît liée surtout à la forme orthographique du motet non pas à la forme de la lettre, contrairement à ce qui est observé au cours de l'apprentissage chez le normolecteur. Ce dysfonctionnement expliquerait une mauvaise programmation motrice au niveau du mot lors de l'écriture. Dans cette étude, le trouble d'écriture est abordé essentiellement sous un aspect sémantique plus que dans l'aspect formel (lisibilité, vitesse d'écriture), mais cet article pose la question des interactions possibles entre trouble du contrôle moteur et trouble dyslexique dans l'écriture.

### **Les troubles du contrôle moteur dans la dyslexie : l'hypothèse cérébelleuse**

Des troubles du contrôle moteur ont été décrits depuis longtemps et par de nombreux auteurs chez des enfants et des adultes dyslexiques. Denckla (1985, cité par Nicolson, 2011) fait état de la présence de signes neurologiques doux chez les enfants dyslexiques qui apparaissent moins performants que des sujets contrôles dans des tâches motrices nécessitant une organisation temporelle rapide et/ou séquentielle (*tapping*, opposition des doigts au pouce) ainsi que dans l'apprentissage de tâches motrices nouvelles. Dans une série de travaux, Nicolson et Fawcett (1990, 1992, 1996, 1999) retrouvent au cours de leurs recherches, la présence de troubles moteurs évoquant un dysfonctionnement cérébelleux (contrôle de l'équilibre, apprentissage de

séquences motrices, clignement conditionné, et tâches d'apprentissage procédural) dans un pourcentage élevé d'adultes et d'enfants dyslexiques ; cette hypothèse a été confortée par des données en IRMf montrant une hypo-activation cérébelleuse. Des résultats semblables sont retrouvés dans d'autres études (Iversen, 2005 ; Moe-Nilsen, 2005 ; Stoodley, 2005). Cette hypothèse a le mérite de chercher à expliquer l'ensemble des troubles observés dans la dyslexie.

Par ailleurs, la plupart des enfants présentant des troubles de coordination ont habituellement des problèmes d'écriture (Miller, 2001, cité par Volman, 2006) ainsi que des troubles de la perception visuelle et de l'intégration visuo-motrice (Schoenmaker, 2001). Plusieurs auteurs (Maeland, 1992 ; Smits Engelmans et Van Galen, 1997 ; 2001 ; Volman *et al.* 2007) ont mis en évidence la présence d'un déficit perceptivo-moteur chez l'enfant dysgraphique. On peut supposer qu'un trouble d'écriture chez l'enfant dyslexique pourrait relever d'un dysfonctionnement qui se situerait soit au niveau des processus perceptivo-moteurs de l'écriture, soit au niveau de processus cognitifs supérieurs comme l'attention, la mémoire, la planification et la programmation ou les processus psycholinguistiques. Comme nous le soulignerons plus loin, ces deux aspects pourraient être réunis dans le contexte de la dyslexie par le biais de comorbidités ou peut-être par un mécanisme commun.

Nous envisagerons d'abord le rôle du cervelet et les arguments en faveur de l'hypothèse cérébelleuse puis nous aborderons les critiques et la problématique des comorbidités.

### **Le cervelet : une composante importante dans le système de contrôle de la motricité**

Le cervelet, grande structure du cerveau postérieur, est un organe régulateur de la fonction motrice. Il assure, en association avec les autres structures impliquées dans cette dernière, plusieurs fonctions portant sur :

- le contrôle postural et l'équilibre du corps avec le tronc cérébral et la moelle épinière ;
- le mouvement volontaire : par le biais d'un circuit de rétroaction entre cervelet et cortex moteur (boucle cortico-cérébello-thalamo-corticale), il aide le cortex moteur à coordonner des schémas moteurs mettant en jeu les régions distales des membres, ce qui produit des mouvements souples, fins, répondant à des fins précises et il joue un rôle en particulier dans le contrôle des mouvements balistiques comme les saccades oculaires nécessaires à la lecture. Il aide également le cortex à programmer l'organisation temporelle et le

séquençage du mouvement qui suivra celui en cours de réalisation, ce qui permet la fluidité et l'harmonie des mouvements ;

- la prévision des vitesses de variation des phénomènes auditifs et visuels, permettant ainsi « l'interprétation spatio-temporelle » de l'information sensitive ;
- les apprentissages sensorimoteurs.

### **Cervelet et neurocognition**

Le rôle du cervelet, bien connu dans le contrôle moteur, commence à être plus étudié dans le domaine des fonctions cognitives (Stoodley, 2008). Il a été évoqué à propos des données de la pathologie clinique chez des adultes et des enfants atteints de lésions cérébelleuses congénitales ou acquises (Stoodley, 2008 ; Konczak, 2007).

#### *Données anatomo-cliniques*

Schmahmann et Sherman ont décrit chez des patients adultes cérébelleux, qu'ils ont suivi sur plusieurs années, un syndrome cérébelleux cognitif et affectif comportant les troubles suivants :

- un trouble des fonctions exécutives portant sur la planification, l'anticipation, le raisonnement abstrait et la mémoire de travail ;
- un trouble de la cognition spatiale concernant la structuration et la mémoire visuo-spatiales ;
- un trouble du langage modéré avec agrammatisme et anomie ;
- des troubles psycho-comportementaux comme une diminution des affects ou un comportement désinhibé (Stoodley, 2008). D'autres études ont corroboré la présence de troubles cognitifs chez des patients cérébelleux (Bailleux, 2008).

Chez l'enfant et l'adolescent, après l'ablation chirurgicale ou une atteinte vasculaire, traumatique ou infectieuse du cervelet, survient un tableau de troubles sensorimoteurs, linguistiques, cognitifs et comportementaux. L'importance de ces derniers est plus marquée en cas de survenue précoce des lésions qui perturbent vraisemblablement le développement des circuits cérébro-cérébelleux (Konczak, 2007).

#### *Données en neuro-imagerie fonctionnelle*

La réalisation de tâches cognitives non motrices par des adultes en bonne santé a montré l'activation du cervelet en IRMf (Stoodley, 2008 ; Stoodley et Schmahmann, 2010) : les hémisphères cérébelleux semblent jouer un rôle prédominant dans les fonctions motrices de haut niveau et sans doute dans les traitements cognitifs, tandis que les parties médianes (vermis et para-vermis) sont surtout impliquées dans les fonctions motrices de base (équilibre, coordination des membres).

### *Implication du cervelet dans les fonctions cognitives*

Le rôle du cervelet a été étudié dans différents domaines comme les fonctions exécutives, l'attention, le langage, la cognition spatiale ainsi que les fonctions d'apprentissage et de mémorisation (Stoodley, 2008 ; Baillieux, 2008). Nous nous intéresserons plus particulièrement, ici, au rôle du cervelet dans l'apprentissage procédural et l'automatisation de séquences motrices. Des travaux expérimentaux portant sur des patients cérébelleux et des sujets sains montrent, chez les premiers, une atteinte de l'apprentissage implicite et non verbal dans des tâches comme l'apprentissage de séquences motrices des doigts et des membres supérieurs, avec des capacités d'apprentissage explicite conservées. Cependant, comme le constate Kozlowski (2007), il est parfois difficile de dissocier les fonctions d'apprentissage moteur du cervelet de ses fonctions dans le contrôle moteur, qui peuvent interférer sur la performance motrice obtenue. L'implication du cervelet a également été retrouvée dans des tâches d'apprentissage procédural non motrices. Les résultats obtenus dans l'ensemble des études ne sont pas univoques et les conditions d'expérimentation prêtent également à discussion, dans la mesure où certaines tâches peuvent faire intervenir également des fonctions motrices comme par exemple les mouvements oculaires (Stoodley, 2008).

La revue des diverses études semble montrer qu'il existe un réseau complexe entre les noyaux cérébelleux profonds et les aires associatives du cortex cérébral impliquées dans le contrôle cognitif et la régulation affective (Baillieux, 2008). Le cervelet ne semble pas impliqué dans un domaine spécifique mais paraît plutôt jouer un rôle dans les processus rythmiques et la régulation temporelle de l'ensemble du fonctionnement cognitif.

### **Cervelet et langage écrit**

Les processus de lecture impliquent l'intégration d'informations visuelles, auditives, linguistiques et motrices ainsi qu'une attention visuelle soutenue et une bonne mémoire de travail. Le cervelet, comme nous l'avons précédemment évoqué, est impliqué dans le contrôle postural et oculomoteur dans l'attention visuo-spatiale, la détection d'erreurs, ainsi que dans les processus de gestion temporelle intervenant dans le traitement des informations sensorielles. Il joue également un rôle dans les aptitudes articulatoires qui sont impliquées dans la constitution de la boucle phonologique, laquelle permet la constitution de la conscience phonologique et de la mémoire phonologique à court terme. Il intervient également

par ailleurs dans les processus d'apprentissage implicite et d'automatisation, qui sont également requis par la tâche de lecture qui repose aussi sur un apprentissage explicite (Stoodley, 2008). Les données retrouvées en IRMf chez des sujets normo-lecteurs montrent que les tâches de lecture, qu'elles concernent les processus phonologique, lexical ou sémantique, activent à la fois les régions motrices et non motrices du cervelet. La localisation varie en fonction du type de tâche (Stoodley et Schmahmann, 2010). Il semble cependant que la tâche de lecture active de façon maximale la région postérolatérale de l'hémisphère cérébelleux droit, qui est aussi impliquée lors d'activités langagières.

Une atteinte dans des tâches de lecture a également été retrouvée, par différents auteurs, chez des patients adultes souffrant d'une lésion cérébelleuse. Mais le petit nombre de patients décrits ainsi que la présence de traitements adjuvants comme la radiothérapie suscitent des critiques vis-à-vis des conclusions tirées de ces études en pathologie clinique (Stoodley, 2008).

Il semble cependant, au vu des divers travaux en neuro-anatomie et en IRMf, que des liens anatomo-fonctionnels puissent être établis entre les différentes régions du cervelet : le cervelet antérieur étant principalement impliqué dans le contrôle moteur, le vermis dans les processus affectifs et le cervelet postérieur dans les processus cognitifs, y compris les processus langagiers (Stoodley et Schmahmann, 2010). Une latéralisation fonctionnelle de l'activité cérébelleuse a également été retrouvée en IRMf chez des patients porteurs d'une atteinte cérébelleuse : les fonctions langagières étant liées à l'hémisphère cérébelleux droit et les fonctions visuo-spatiales à l'hémisphère cérébelleux gauche.

L'implication du cervelet dans les processus sous-jacents à l'écriture semble donc avérée à plusieurs niveaux : il interviendrait dans la composante visuo-spatiale de l'écriture et dans le contrôle moteur graphique. Il permettrait également de détecter, par l'intégration des informations proprioceptives et visuelles, les erreurs et les ajustements nécessaires aux mouvements requis pour la production des traits et des lettres. Fournier del Castillo (2010) a décrit un cas de dysgraphie périphérique chez un enfant présentant une atrophie cérébelleuse acquise.

### **Dysfonctionnement cérébelleux et dyslexie**

#### *Données anatomiques*

Certains auteurs ont trouvé des corrélations entre des anomalies morphologiques du cervelet et les résultats dans certaines tâches de décodage

phonologique et de dénomination rapide : une asymétrie de volume de la substance grise des hémisphères cérébelleux plus marquée à droite a été retrouvée chez les sujets contrôles mais pas chez les sujets dyslexiques qui apparaissent plus symétriques (Rae, 2002). Cependant, une telle anomalie a également été retrouvée chez des patients schizophrènes, ce qui témoignerait davantage d'un trouble plus général du développement cérébral (Leonard, 2008).

#### *Données en imagerie neuro-fonctionnelle*

La comparaison entre sujets normo-lecteurs et sujets dyslexiques dans des tâches variées de lecture en TEP et en IRMf, montre une hypoactivation du cervelet ainsi qu'une réduction des influx nerveux entre cervelet et régions corticales frontales chez les dyslexiques (Stanberry, 2006 cité par Stoodley, 2011). On observe également une moindre activation cérébelleuse chez des sujets dyslexiques dans des tâches d'apprentissage procédural (Nicholson, 1999 ; Menghini, 2008).

#### *Données cliniques*

Le contrôle des mouvements oculaires dans des tâches de lecture apparaît différent chez les sujets dyslexiques et chez les sujets normo-lecteurs : certains dyslexiques ont des fixations oculaires plus longues et moins régulières. De plus, chez les dyslexiques, le nombre de retours en arrière est moins important lorsque l'orthographe est transparente (italien, allemand) que lorsqu'elle est plus opaque comme l'anglais. Il faut noter cependant la possibilité d'amélioration des troubles oculo-moteurs avec un entraînement (Fischer et Hartnegg, 2000). Curieusement, des troubles de l'équilibre et de la posture ont été observés par divers auteurs chez des sujets dyslexiques (Fawcett et Nicolson, 1999 ; Moe-Nilssen, 2003 ; Stoodley, 2005) mais ces troubles ne sont pas systématiques dans la population dyslexique. Ces difficultés observées seraient plutôt liées à une co-morbidité avec un trouble d'acquisition des coordinations motrices (TAC) et/ou un déficit d'attention avec ou sans hyperactivité (TADAH). Cependant, ces troubles seraient spécifiques à la population dyslexique, comme le montre une étude de Fawcett (2001) qui retrouve une corrélation entre les résultats aux épreuves posturales et aux épreuves de lecture. Les troubles posturaux sont plus prégnants chez les enfants dyslexiques et semblent s'amender à l'âge adulte (Ramus, 2003), ce qui argumenterait en faveur d'un retard de maturation des systèmes impliqués dans le contrôle de l'équilibre plutôt que d'un dysfonctionnement durable. Les sujets dyslexiques seraient également plus lents que les sujets normo-lecteurs

dans des tâches de motricité fine, nécessitant une coordination visuo-motrice (Stoodley et Stein, 2006 ; Velay *et al.*, 2002 ; Catts, 2002). Mais là encore, ces résultats dépendent des études et le rôle d'un déficit attentionnel est encore évoqué par certains auteurs (Shanahan, 2006).

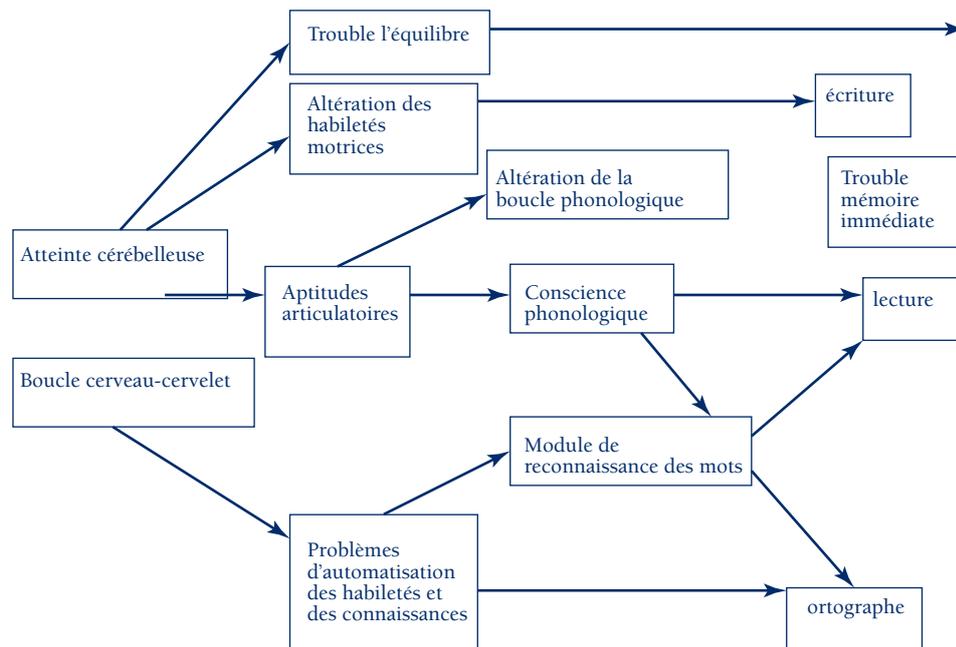
Un trouble de l'apprentissage moteur procédural est constaté dans plusieurs études chez les sujets dyslexiques, en particulier en ce qui concerne l'aspect séquentiel de la tâche implicite (Bennett 2008, cité par Stoodley, 2008). La reconnaissance des séquences apprises semble plus difficile pour les dyslexiques. Ce déficit d'apprentissage procédural est également retrouvé dans des tâches phonologiques (Boada et Pennington, 2006). Stoodley (2008) trouve des corrélations significatives entre les scores obtenus dans des tâches d'apprentissage implicite et ceux obtenus aux épreuves cognitives et du langage écrit. Ces résultats expliqueraient les difficultés de fluence en lecture qui perdurent chez les dyslexiques malgré les remédiations pratiquées. L'hypothèse cérébelleuse a le mérite de considérer une explication commune à l'ensemble des troubles observés dans la dyslexie :

- un déficit phonologique va découler d'un mauvais traitement des informations auditives ainsi que d'un défaut des capacités articulaires et entraîner un trouble de la lecture ;
- des troubles oculomoteurs ainsi qu'un mauvais traitement des informations visuelles seront à l'origine de la dysorthographe ;
- enfin les troubles moteurs d'origine cérébelleuse provoquent des troubles de l'écriture.

Le déficit de l'apprentissage procédural consécutif à l'atteinte cérébelleuse produira un défaut d'automatisation des compétences linguistiques et grapho-motrices (Nicolson et Fawcett, 1996, 1999 ; Habib, 2002). Ces relations entre les différents troubles et l'atteinte cérébelleuse sont résumées sur la figure 3.

#### **Critiques de la théorie cérébelleuse**

La théorie cérébelleuse a fait l'objet de nombreuses critiques. En particulier, il a été pointé que les troubles du contrôle moteur ne soient pas retrouvés de façon systématique chez tous les enfants dyslexiques, bien qu'ils apparaissent chez plus de la moitié de la population étudiée. Ramus (2003, 2006) concède l'existence d'une corrélation entre la présence d'un trouble du contrôle moteur et celle d'un trouble de lecture mais il estime que ceci n'induit pas une relation de causalité. Il constate que les troubles du contrôle moteur sont beaucoup moins importants chez les dyslexiques adultes et évoque alors un retard de développement moteur qui se comblerait à l'âge adulte. En



**Figure 3.** Schéma explicatif des différents symptômes de la théorie motrice de la dyslexie (Nicolson, 2001) d'après Habib (2002), Bases neurologiques des troubles spécifiques d'apprentissage.

revanche, le trouble phonologique semble directement lié au trouble de lecture et les compétences en langage écrit ne diffèrent pas, qu'il y ait ou non un syndrome sensori-moteur associé à la dyslexie phonologique. De plus, il existe au sein du trouble dyslexique plusieurs profils possibles, dont l'hypothèse cérébelleuse ne peut à elle seule rendre compte. Avec d'autres auteurs (Denckla, 1985 ; Wimmer, 1999 ; Chaix, 2007), Ramus souligne aussi le rôle d'un trouble d'attention associé, pouvant expliquer les troubles du contrôle moteur. Des études cliniques citées par Nicolson (2011) font état d'une comorbidité entre dyslexie et TADHA variant entre 25 et 40 %. Un trouble d'acquisition des coordinations est souvent associé à la dyslexie, ce qui peut, selon Ramus, être suffisant pour expliquer les troubles moteurs observés dans certains cas de dyslexie. L'hypothèse cérébelleuse pourrait être l'explication causale d'un sous-groupe particulier de dyslexies.

### **Troubles des apprentissages : vers un nouveau cadre théorique**

#### **Comorbidités entre les troubles développementaux**

Comme nous l'avons évoqué précédemment, de nombreuses études cliniques ont mis en exergue que la dyslexie est le plus souvent associée qu'isolée : 10 % de dyslexies « pures » dans l'étude

d'Habib (2003) portant sur 177 cas d'enfants dyslexiques (Expertise collective – INSERM, 2007). L'association de troubles développementaux comme les troubles spécifiques du langage oral, la dyslexie, la dyscalculie, le TADHA, le TAC, la dysgraphie a été constatée de longue date. Des troubles moteurs mineurs sont souvent décrits chez des enfants présentant ces mêmes pathologies (Gillberg, 2003). O'Hare et Khalid (2002) montrent la présence, chez des enfants présentant un TAC, de troubles phonologiques et de lecture et évoquent de nouveau l'hypothèse d'un dysfonctionnement cérébelleux. Dans une étude de 2001 portant sur des enfants suivis pour trouble d'apprentissage, Kaplan *et al.* montrent un fort risque d'association à un autre trouble développemental en cas de dyslexie ou de TADHA avérés. Plus récemment, Albaret *et al.* (2009) évoquent la comorbidité entre trouble spécifique du langage oral et troubles du contrôle moteur, ces derniers revêtant une importance variable, du simple retard de développement au véritable TAC.

Dès les années 1960, la recherche d'une étiologie neurobiologique commune avait été évoquée, en particulier avec le concept de *minimal brain dysfunction* » (Clements, 1962, cité par Nicolson et Fawcett, 2007), puis dans les années 1980 avec celui de *deficit in attention, motor control and perception* (DAMP) élaboré par les auteurs scandinaves (Gillberg, Kadesjö, 1983 cités par

Nicolson, 2011) qui tentait de rendre compte de l'association du TADHA avec le TAC et qui avait été vivement critiqué. Plus récemment, émerge celui d'*atypical brain development* pour tenter d'expliquer l'hétérogénéité des troubles du développement et les comorbidités fréquentes (Gilger et Kaplan, 2001). Ces auteurs soulignent que, dans les troubles développementaux, la comorbidité est la règle et non l'exception.

Les progrès en imagerie cérébrale ont également permis de faire avancer les recherches et les hypothèses explicatives de troubles développementaux. Piek et Dyck (2004) observent que des processus différents, et vraisemblablement des aires cérébrales différentes, sont à l'origine du TDAHA et du TAC mais que le rôle du cervelet pourrait constituer un point commun entre les deux comorbidités. Ils évoquent également les hypothèses neurobiologiques faites à l'endroit de l'autisme et la possibilité d'un trouble du développement des connexions neuronales entre différentes régions cérébrales qui entraînerait un trouble d'intégration du fonctionnement cérébral.

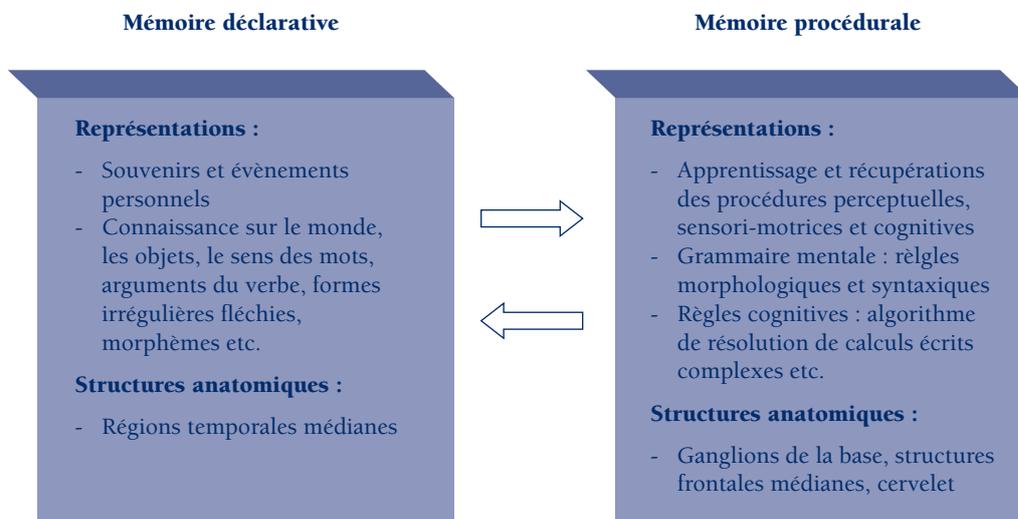
#### Trouble de l'apprentissage procédural et troubles développementaux chez l'enfant

Ullman et Pierpont (2005) ont proposé un modèle intégratif de la mémoire à long terme, inspiré du modèle de Cohen et Squire (1980) permettant d'associer le langage aux autres fonctions cognitives. Alors que le système de mémoire déclarative est accessible à la conscience sous forme de langage ou d'image mentale et peut donc s'exprimer assez facilement verbalement (connaissances, concepts, événements de la vie personnelle), le système de mémoire procédurale est indissociable de l'action et peu verbalisable.

Il s'acquiert et s'exprime de façon inconsciente au cours des activités du sujet (automatisation) et il repose sur un apprentissage implicite, non verbalisable (apprendre à faire de la bicyclette, à jouer d'un instrument de musique) ; il concerne tous nos savoir-faire et constitue une mémoire très robuste. Il serait impliqué également dans le langage, dans la grammaire mentale (règles morphologiques et syntaxiques). Ullman et Pierpont (2005) posent l'hypothèse d'une atteinte des structures cérébrales impliquées dans les processus de mémoire procédurale afin d'expliquer l'association de troubles du langage oral et de troubles moteurs..

L'observation de l'apprentissage de séquences motrices chez l'adulte et chez l'enfant montre que l'apprentissage moteur passe par plusieurs étapes cognitives et par plusieurs types de représentations qui diffèrent à la phase précoce et à la phase d'automatisation ; la nouvelle compétence ainsi acquise deviendra résistante à l'interférence après la consolidation et même après une période longue sans pratique (Orban *et al.*, 2008). Les processus sous-jacents à ce type d'apprentissage peuvent être de nature explicite ou implicite selon que le sujet a conscience ou non du matériel à apprendre et peuvent être tous deux impliqués. Il semble, d'après ces mêmes auteurs, que la procédure implicite soit prédominante durant le début d'un apprentissage incident (non intentionnel) tandis qu'avec la répétition, les processus explicites pourraient se développer en parallèle. La structure de la séquence influence aussi le type de processus mis en jeu.

Comme nous l'avons évoqué plus haut, des travaux expérimentaux menés auprès de sujets dyslexiques (Vicari *et al.*, 2003 ; Howard *et al.*, 2006 ;



**Figure 4.** Représentation schématique de l'interrelation entre la mémoire à long terme et le langage d'après Macoir et Fossard (2008), *Mémoire à long terme et langage : différenciation entre l'accès aux mots en mémoire déclarative et l'application de règles en mémoire procédurale.*

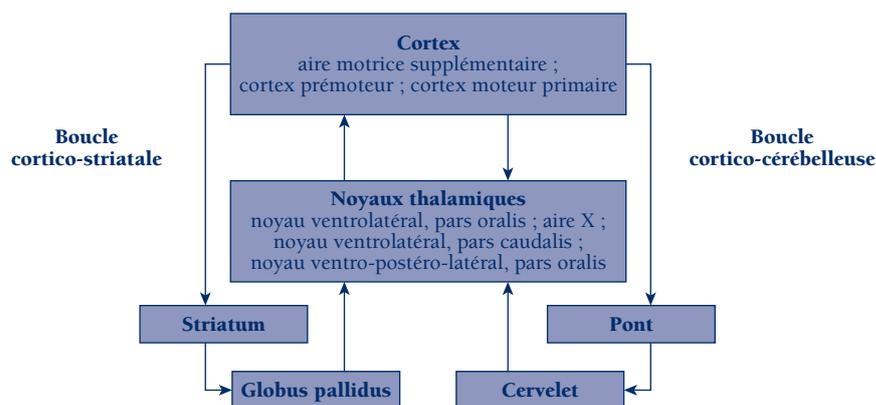
Stoodley et Stein, 2006) ont montré un déficit de l'apprentissage implicite de séquences motrices ainsi que de séquences visuelles. Des réponses motrices appropriées étaient obtenues lorsque les stimuli étaient présentés de façon aléatoire mais les dyslexiques ne pouvaient automatiser leur apprentissage lors de la présentation d'une configuration séquentielle de stimuli successifs, ce qui se manifestait par une absence de réduction de leur temps de réponse (Orban *et al.*, 2008). Lorsque la séquence était explicitée, leurs performances se normalisaient, ce qui étayerait la thèse d'un déficit de l'apprentissage implicite ou procédural chez les dyslexiques, leurs capacités d'apprentissage explicites paraissant conservées.

Comme indiqué sur la figure 5, les systèmes de mémoire déclarative et de mémoire procédurale reposent sur des réseaux neuronaux indépendants mais interconnectés. Le système procédural est constitué par un réseau impliquant les ganglions de la base, le cortex frontal (aire de Broca, régions prémotrices), le cortex pariétal, le cortex temporal supérieur et le cervelet. Deux boucles principales sont identifiées lors de l'apprentissage de séquences motrices nouvelles : les systèmes cortico-cérébelleux tandis que cortico-striatal interagissent à la phase précoce puis une fois la consolidation effectuée et l'exécution automatique possible, le cervelet n'est plus mis en jeu. Ainsi que le souligne Doyon (2009), le striatum et les aires corticales motrices (cortex moteur primaire, aire motrice supplémentaire, cortex prémoteur et cortex cingulaire) sont impliqués non seulement dans l'encodage mais aussi dans la mémorisation à long terme des séquences motrices et le circuit cortico-cérébelleux intervient dans l'adaptation motrice aux modifications de l'environnement. Ces deux circuits seraient décomposés chacun en deux sous-circuits, responsables l'un du langage (implication des régions frontales liées au langage) et l'autre de la motricité (cortex

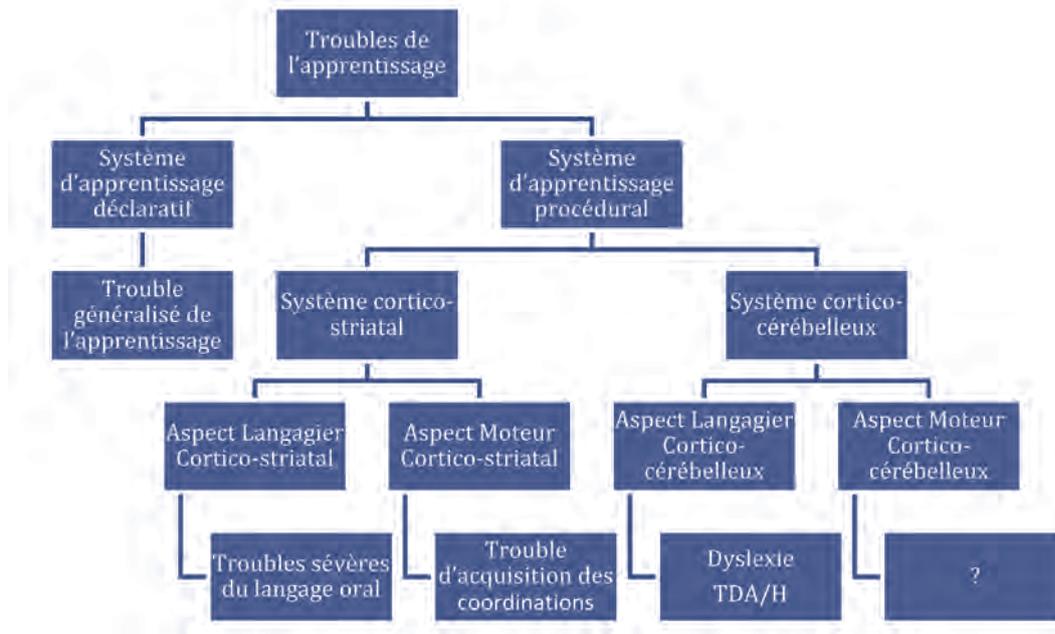
moteur primaire).

À partir du modèle développé par Ullman et Pierpont (2005), Nicolson et Fawcett (2007, 2011) proposent un nouveau modèle intégratif impliquant les deux systèmes d'apprentissage déclaratif-procédural pour expliquer les troubles du développement (figure 6). Ils font l'hypothèse que la dyslexie découlerait d'une atteinte du circuit cortico-cérébelleux dans son aspect langagier. En ce qui concerne la dysgraphie, on peut envisager l'implication de la boucle cortico-cérébelleuse dans son aspect moteur. Un sous-groupe d'enfants dyslexiques présenterait aussi un trouble de l'apprentissage moteur par atteinte du circuit cortico-cérébelleux en plus d'un trouble d'écriture. Ce modèle permettrait de mieux comprendre l'association entre trouble de la lecture et de l'écriture. Cela expliquerait l'hétérogénéité observée également dans les divers troubles développementaux du contrôle moteur : l'atteinte du circuit cortico-striatal entraînerait un trouble dans les activités motrices séquentielles et une légère maladresse, celle du circuit cortico-cérébelleux des troubles de l'équilibre ainsi qu'une mauvaise régulation temporelle du geste (figure 7).

Toute lésion ou atteinte d'une des structures cérébrales impliquées dans le système d'apprentissage procédural produirait un trouble ou un retard dans l'acquisition de la compétence reliée à cette région. Il y aurait aussi, si l'on tient compte de la disposition des différents systèmes d'apprentissage, la possibilité d'avoir recours au système intact pour compenser le déficit et de générer par cela même d'autres troubles (Thomas, 2005 cité par Albaret, 2009). Ce cadre théorique a le mérite d'essayer d'expliquer, par une origine neurobiologique commune, la grande hétérogénéité des profils cognitifs observés dans les troubles développementaux rencontrés.



**Figure 5.** Schéma des structures corticales et sous-corticales impliquées dans la partie motrice des boucles cortico-striatale et cortico-cérébelleuse, d'après Albaret et De Castelnau (2009).



**Figure 6.** Caractéristiques des systèmes neuronaux susceptibles d'être à l'origine des troubles spécifiques d'apprentissage d'après Nicoloson et Fawcett (2011).

### Troubles d'écriture et dyslexie : une approche expérimentale

Dans ce contexte théorique, nous avons initié une étude sur les éventuels troubles graphomoteurs des enfants dyslexiques (Beecham et Cariou, 2011). Lorsque nous avons débuté cette étude, nous nous basions sur des travaux précédents qui avaient montré que l'écriture des dyslexiques ne se différenciait pas de celle des normo-lecteurs lorsqu'il s'agissait d'écrire des lettres cursives isolées (Velay *et al.*, 2009) ou un mot d'orthographe simple (lapin) en lettres cursives (Paz-Villagran *et al.*, 2011). Nous avons donc décidé de rendre la tâche d'écriture un peu plus complexe et proche de l'écriture réellement pratiquée en faisant écrire une phrase courte en lettres cursives et la même phrase en lettres majuscules. Le risque avec une situation d'écriture plus « écologique » était de rendre la tâche trop difficile pour les dyslexiques en leur demandant d'écrire des mots qui leur posaient des problèmes d'orthographe. Dans ce cas-là, obtenir des différences entre les dyslexiques et les normo-lecteurs serait simplement la cause de ralentissements liés aux hésitations des enfants dyslexiques dues à l'orthographe compliquées des mots, et aux difficultés graphomotrices elles-mêmes.

Nous avons donc choisi une phrase constituée de mots orthographiquement simples et d'un mot complexe (un pseudo-mot inconnu des enfants). L'hypothèse initiale était qu'une différence éventuelle entre les enfants dyslexiques et les enfants-témoins pour l'écriture des mots simples devrait traduire des difficultés

graphomotrices alors qu'une différence au moment de l'écriture du mot difficile pourrait relever de difficultés à la fois orthographiques et graphomotrices. Nous avons supposé que l'écriture des enfants dyslexiques ne devrait pas se différencier de celles des normo-lecteurs pour les mots simples en lettres cursives, mais qu'elle devrait être plus lente pour le pseudo-mot. Le choix de la graphie en majuscules reposait sur la même idée : les majuscules étant moins souvent utilisées par les enfants, leur écriture est moins automatisée et, si les enfants dyslexiques présentent un trouble de l'automatisation des séquences motrices, celui-ci devrait être plus manifeste dans cette graphie. En outre, les lettres majuscules obligent à des levers plus fréquents que les lettres cursives et elles permettent de distinguer les levers entre lettres, ce qui n'est pas possible en cursives. L'enregistrement de l'écriture au moyen d'une tablette graphique a montré l'intérêt des mesures des temps en l'air pour caractériser objectivement l'écriture dysgraphique. (Rosenblum *et al.*, 2003). Nous avons supposé que les performances d'écriture en majuscules seraient moins bonnes pour tous les enfants, et de façon encore plus marquée chez les dyslexiques. La comparaison de toutes ces mesures devrait permettre de spécifier le trouble éventuel de l'écriture chez l'enfant dyslexique. Nous avons aussi distingué quatre groupes d'enfants : les enfants dyslexiques uniquement, ne présentant pas de difficultés graphomotrices manifestes, les enfants dyslexiques ayant aussi des difficultés

graphomotrices attestées et donc diagnostiqués dysgraphiques, les enfants dysgraphiques mais sans troubles de la lecture, et enfin les enfants témoins normo-lecteurs et normo-scripteurs.

## Méthodes et protocole expérimental

### Population étudiée

Trente-cinq enfants de langue maternelle française, âgés de 8 ans et deux mois à 11 ans et quatre mois ont participé à cette étude. Tous les enfants ont bénéficié d'une évaluation de leur niveau d'écriture par une échelle d'évaluation rapide de l'écriture chez l'enfant : l'échelle BHK (Hamstra-Bletz *et al.*, 1993 ; Charles *et al.*, 2003). Cela nous a permis de détecter une éventuelle dysgraphie. Nous avons évalué leur âge de lecture par le test de l'Alouette (Lefavrais, 1965). Nous les avons répartis dans quatre groupes :

- 15 témoins normo-scripteurs normo-lecteurs (NS-NL) ;
- 7 normo-scripteurs dyslexiques (NS-DL) ;
- 9 dysgraphiques dyslexiques (DG-DL) ;
- 4 dysgraphiques normo-lecteurs (DG-NL).

### Critères d'inclusion

Les 15 enfants-témoins (NS-NL) ont été recrutés dans des classes de CE2 et CM1 d'écoles publiques de niveau socioculturel semblable, à Marseille et à Aix-en-Provence. Ils ont été appariés aux sujets dyslexiques et dysgraphiques en fonction du sexe, de l'âge et du milieu socioculturel. La dyslexie étant avérée à partir d'un âge de lecture correspondant à 18 mois de retard par rapport à la norme, nous avons retenu comme enfants témoins uniquement les sujets ayant un âge de lecture correspondant à 6 mois de retard maximum par rapport à la norme, afin d'éviter l'ambiguïté induite par les scores à la limite du pathologique.

Les 16 enfants dyslexiques ont été recrutés dans des cabinets d'orthophonistes de niveau socioculturel semblable. Le diagnostic de dyslexie a été effectué par des tests standardisés pour le dépistage des troubles spécifiques du langage oral et écrit : le bilan de langage L2MA (Chevrie-Muller, 1997), ou la batterie analytique du langage écrit (BALE, groupe Cogni-sciences, laboratoire de psychologie et neuro cognition, 2010). Parmi les 16 enfants dyslexiques nous avons dépisté 9 enfants avec une dysgraphie associée (DG-DL) et 7 enfants sans dysgraphie associée (NS-DL).

Les 4 enfants inclus dans le groupe des sujets dysgraphiques non dyslexiques (DG-NL) ont été diagnostiqués par l'échelle BHK au centre de référence des troubles des apprentissages de l'hôpital

de La Timone à Marseille, ou dans des cabinets de psychomotriciens de niveau socioculturel semblable, à Marseille et à Aix-en-Provence.

		Filles	Garçons	Droitiers	Gauchers
Témoins	15	7	8	15	0
DL- DG	9	3	6	8	1
DL non DG	7	4	3	5	2
Dysgraphiques	4	0	4	3	1
Total	35	14	21	31	4

**Tableau 1.** Répartition du genre et de la latéralité dans la population expérimentale.

### Matériel

La tâche d'écriture a été effectuée sur une tablette graphique Wacom Intuos 3 format A5. Cet outil permet de suivre le déplacement du stylet avec une très bonne précision spatiale (0,25 mm) et temporelle (200 mesures/s). Le stylet utilisé est un stylo à bille de taille et de tenue classique. Une feuille de papier est scotchée sur la tablette et l'écriture est produite dans des conditions se rapprochant d'une situation écologique. La feuille de papier est blanche et contient des lignes pré-tracées afin que les enfants puissent écrire dans un cadre ni trop libre, ni trop contraignant. Il faut noter que le contact du stylet sur la tablette n'est pas obligatoire pour que la position du stylet soit connue ; la tablette détecte la position du stylet environ 1 cm au-dessus de la surface. Cela permet de suivre en continuité le déplacement du stylo, en particulier pendant les trajets effectués « en l'air ».

### Tâche d'écriture proposée et déroulement de l'expérimentation

La phrase choisie comme test d'écriture dans cette expérience était : « Le cheval parle vlak. » Nous avons demandé aux enfants d'écrire 5 fois cette phrase dans deux allographes différents : lettres cursives et majuscules. Les mots constituant la phrase ont été sélectionnés grâce à l'échelle d'acquisition en orthographe lexicale ÉOLE (Pothier et Pothier, 2003) et à l'échelle orthographique de Dubois-Buyse (1988) afin de garantir leur acquisition chez des enfants de CE2. La correspondance grapho-phonémique est stable et il n'y a pas d'irrégularités orthographiques. Pour constituer le pseudo-mot, la fréquence d'association des lettres en français a été vérifiée grâce à la banque de données lexicales numérisée Manulex (Peere-man *et al.*, 2007). Nous avons présenté et fait épeler plusieurs fois ce pseudo-mot pour procéder à sa rétention ; en revanche, nous n'avons donné aucune indication quant à l'apprentissage moteur de la séquence graphique.

## Déroulement de l'expérimentation

La passation s'est déroulée de la manière suivante :

- 1) Nous avons présenté, puis dicté la phrase « le cheval parle ». La consigne donnée aux enfants pour cette dictée a été : « Je vais te montrer une phrase et puis après tu vas l'écrire. »
- 2) Nous avons soumis les enfants à l'apprentissage du pseudo-mot « vlak » par une épelation avec le modèle, suivie de trois épelations sans le modèle. La consigne donnée aux enfants a été : « Maintenant je vais te montrer un mot nouveau que tu ne connais pas et que tu vas apprendre. On le lit "vlak" et il s'écrit V.L.A.K. À toi de lire le mot puis de l'épeler. Épelle-le encore trois fois sans le modèle. »
- 3) Nous avons dicté la phrase simple associée au pseudo-mot appris « le cheval parle vlak », cinq fois. La consigne donnée aux sujets pour cette dictée a été : « Maintenant tu vas écrire "le cheval parle vlak" plusieurs fois, dans ton écriture normale » et la phrase a été répétée par l'examineur à chaque production. Afin d'éviter un éventuel rétro-contrôle visuel entraînant un biais dans les mesures temporelles, les productions des sujets ont été cachées au fur et à mesure.
- 4) Enfin, nous avons présenté puis dicté la phrase associée au pseudo-mot, en lettres majuscules : « LE CHEVAL PARLE VLAK. » La consigne donnée pour cette dictée a été : « On va changer l'exercice, tu vas écrire la même phrase, mais cette fois tu écris en majuscules en lettres bâtons. Regarde je te montre un exemple. »

Au total, la tâche d'écriture durait 15 minutes environ.

## Traitement des données

Après avoir enregistré l'écriture sur la tablette graphique, nous avons segmenté les acquisitions brutes pour mesurer les variables temporelles pertinentes au regard de nos hypothèses. La segmentation a été réalisée grâce au logiciel Écriture-Suite® (développé au laboratoire de Neurosciences Cognitives à Marseille). Les tracés effectués lors de la production écrite correspondent à chacun des mouvements du stylet sur la feuille, et apparaissent avec une couleur différente pour chaque segment afin de mieux les identifier. Les segments correspondant aux mouvements du stylet en l'air apparaissent tous en gris (figures 7 à 10).

### Segmentation des phrases en lettres cursives

Nous avons procédé à la segmentation des phrases écrites en lettres cursives en regroupant

les segments constitutifs de chaque mot. Un mot segmenté est constitué de levers et de tracés. Nous avons ainsi obtenu sept segments pour chaque phrase : quatre segments correspondant aux mots de la phrase, et trois segments correspondant aux déplacements en l'air entre les mots.

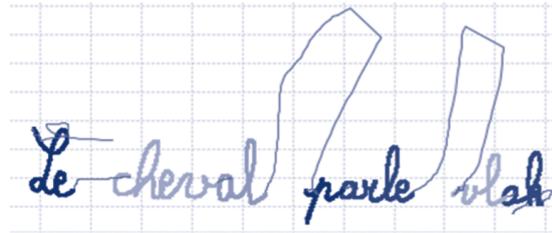


Figure 7. Phrase en écriture cursive avant segmentation : les mots peuvent inclure des sous-segments si l'enfant a levé le stylo à l'intérieur du mot.

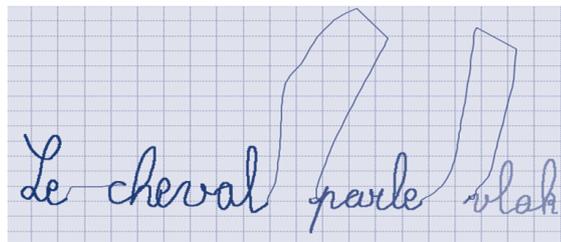


Figure 8. Phrase en écriture cursive segmentée en 7 segments : les sous-segments des mots ont été fusionnés afin que chaque mot ne soit constitué que d'un seul segment.

### Segmentation des phrases en lettres majuscules

Nous avons procédé à la segmentation des phrases écrites en lettres majuscules en regroupant les segments constitutifs de chaque lettre. Une lettre majuscule segmentée est constituée de levers et de tracés. Nous avons ainsi obtenu 33 segments pour chaque phrase : 17 segments correspondant aux lettres de la phrase, et 16 segments correspondant aux déplacements en l'air entre les lettres.

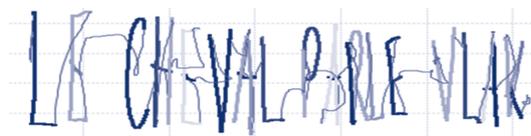


Figure 9. Phrase en écriture majuscule avant segmentation : les lettres peuvent inclure des sous-segments.

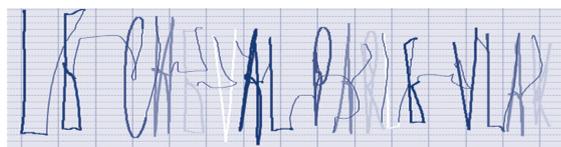


Figure 10. Phrase en écriture majuscule segmentée en 33 segments : les sous-segments constitutifs des lettres ont été fusionnés afin que chaque lettre soit constituée que d'un seul segment.

### Données analysées

Pour chaque sujet, nous avons recueilli et analysé les variables suivantes :

- dans les phrases en écriture cursive :
  - la vitesse d'écriture des mots,
  - la durée des mots (incluant les temps en l'air à l'intérieur des mots),
  - la durée des intervalles entre les mots ;
- dans les phrases en écriture majuscule :
  - la vitesse d'écriture des mots,
  - la durée des mots (incluant les temps en l'air entre les lettres et à l'intérieur des lettres),
  - la durée des lettres (incluant seulement les temps en l'air à l'intérieur des lettres),
  - la durée des intervalles entre les mots,
  - la durée des intervalles entre les lettres.

La vitesse d'écriture correspond à la distance totale tracée divisée par le temps d'écriture. Elle s'applique seulement aux segments tracés et ne tient pas compte des segments en l'air. La durée d'écriture de chaque mot (*le*, *cheval*, *parle* et *vlak*) a été normalisée en la divisant par le nombre de lettres qui le composent, afin de pouvoir comparer les mots entre eux. La durée d'écriture comprend des segments tracés et des segments en l'air. Chacune de ces variables a fait l'objet d'une ANOVA. Le seuil d'acceptation de différences significatives a été  $p < 0,05$ . Quand cela était nécessaire, nous avons effectué les tests post-hoc avec le test HSD de Tuckey.

## Résultats

### Lettres cursives

Les résultats obtenus dans le test d'écriture en lettres cursives sont résumés dans le tableau 2.

	Vitesse Mots	Durée Mots	Intervalles Inter Mots
TÉMOINS	20,69	0,97	0,84
DL	18,69	0,98	1,22
DL-DG	21,60	0,98	1,12
DG	22,48	0,90	0,68

**Tableau 2.** Vitesse des mots (mm/s), durée des mots (s) et durée des intervalles inter-mots pour les quatre groupes d'enfants.

### Vitesse d'écriture des mots

Les quatre groupes (témoins, DL, DG, DL-DG) écrivent les mots à une vitesse comparable (21 mm/s en moyenne) et non significativement différente ( $F < 1$ ). En revanche, tous les mots ne sont pas écrits à la même vitesse. Le pseudo-mot « vlak » est écrit plus lentement que les autres mots ( $p < 0,001$ ) qui ne se différencient

pas significativement entre eux. Cet effet du mot est le même pour les quatre groupes (l'interaction « groupe x mot » est non significative).

### Durée d'écriture des mots en cursives

La durée d'écriture des mots n'est pas différente pour les quatre groupes ( $F < 1$ ). Cependant, la durée d'écriture n'est pas la même pour tous les mots ( $F[3,93] = 39,8$ ,  $p < 0,001$ ). Les tests post-hoc montrent que la durée d'écriture du pseudo-mot « vlak » est significativement plus longue que celle des autres mots ( $p < 0,001$ ).

### Durée des intervalles entre les mots en cursives

Les intervalles entre les mots n'ont pas la même durée pour tous les groupes ( $F[3,31] = 3,7$ ,  $p < 0,05$ ). Les tests post-hoc montrent que les dyslexiques non dysgraphiques (DL) ont des intervalles entre les mots plus longs par rapport aux témoins ( $p < 0,07$ ) et par rapport aux dysgraphiques ( $p < 0,06$ ), mais ne se différencient pas des dyslexiques dysgraphiques (DL-DG). La durée de l'intervalle entre les mots n'est pas la même pour tous les mots ( $F[2,62] = 5,8$ ,  $p < 0,005$ ). Les tests post-hoc montrent que la durée de l'intervalle avant le pseudo-mot « vlak » est significativement plus longue que la durée des intervalles précédant « cheval » ( $p < 0,01$ ) et « parle » ( $p < 0,05$ ). Les deux derniers intervalles ne se différencient pas entre eux. Cet effet est le même pour les quatre groupes d'enfants (interaction groupe par mot non significative).

Comme on peut le voir dans le tableau 2, les deux groupes incluant des enfants dyslexiques (DL et DL-DG) présentent des intervalles plus longs que les deux autres groupes de sujets (témoins et DG). C'est donc le caractère « dyslexie » qui détermine la durée des intervalles. Cela nous a conduits à faire une analyse en regroupant les sujets dyslexiques pour les comparer aux sujets non dyslexiques. Cette analyse a confirmé que les dyslexiques ont bien un intervalle entre les mots plus long que les non-dyslexiques ( $F[1,33] = 10,1$  ;  $p < 0,005$ , figure 11).

En outre, les tests *post-hoc* montrent que c'est avant le pseudo-mot « vlak » que les dyslexiques ont un intervalle significativement plus long que les non dyslexiques ( $p < 0,02$ ).

### Lettres majuscules

Les résultats obtenus en situation d'écriture en majuscules sont résumés dans le tableau 3.

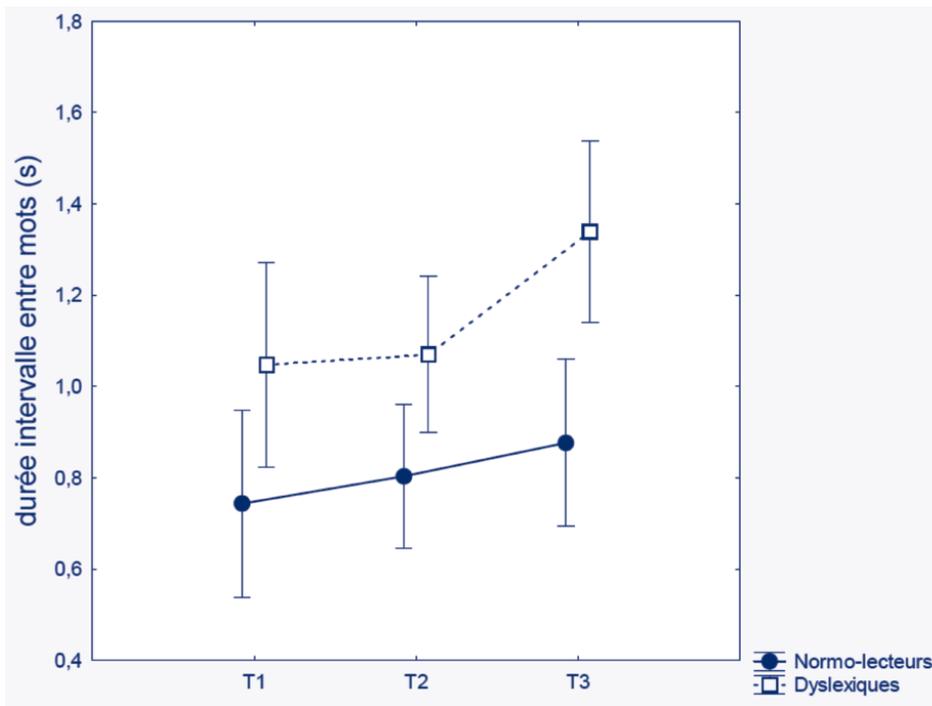


Figure 11. Durée des intervalles entre les mots chez les normo-lecteurs et les dyslexiques. T1 représente l'intervalle entre « le » et « cheval », T2 entre « cheval » et « parle » et T3 entre « parle » et « vlak ».

	Vitesse	Durée d'écriture		Durée des intervalles	
	Mots	Mots	Lettres	Inter-mots	Inter-lettres
Témoins	28,03	1,28	0,91	0,80	0,52
DL	22,07	1,75	1,08	1,39	0,90
DL-DG	25,40	2,00	1,18	1,77	1,08
DG	28,12	1,38	1,00	0,84	0,53

Tableau 3. Vitesse des mots (mm/s), durée des mots (s) et durée des intervalles inter-mots et inter-lettres pour les quatre groupes d'enfants.

### Vitesse d'écriture des mots

Les quatre groupes écrivent les mots à une vitesse comparable (en moyenne 25 mm/sec,  $F < 1$ ), mais tous les mots ne sont pas écrits à la même vitesse ( $F[3,90] = 9,2$  ;  $p < 0,001$ ). Cette différence entre mots est la même pour les quatre groupes d'enfants (interaction groupe par mot non significative).

### Durée totale d'écriture des mots (incluant les temps en l'air entre les lettres et à l'intérieur des lettres)

La durée totale d'écriture des mots n'est pas la même pour tous les groupes ( $F[3,30] = 3,6$  ;  $p < 0,05$ ). En fait, comme on peut le voir dans le tableau 3, les deux groupes incluant des sujets dyslexiques (DL et DL-DG) présentent les durées d'écriture des mots les plus longues relativement

aux deux autres groupes de sujets (témoins et DG). Cela nous a conduits à faire une analyse en regroupant les sujets dyslexiques pour les comparer aux sujets non dyslexiques. Cette analyse révèle que les dyslexiques ont effectivement une durée totale d'écriture plus longue que les non-dyslexiques ( $F[1,32] = 10,2$  ;  $p < ,005$ , figure 12). La durée totale d'écriture n'est pas la même pour tous les mots ( $F[3,99] = 15,1$  ;  $p < 0,001$ ), et l'interaction groupe par mot est significative ( $F[3,96] = 8,4$  ;  $p < 0,001$ ). Les tests post-hoc montrent que les dyslexiques et les non-dyslexiques ont une durée d'écriture du mot « PARLE » significativement plus longue ( $p < 0,001$ ) et ont une tendance à être aussi plus longs pour « CHEVAL » ( $p < 0,07$ ) et « VLAK » ( $p < 0,10$ ).

### Durée des lettres (incluant les temps en l'air à l'intérieur des lettres)

Les deux groupes incluant des sujets dyslexiques (DL et DL-DG) présentent les durées d'écriture des lettres les plus longues que les deux autres groupes de sujets (témoins et DG, tableau 3). Une analyse regroupant les sujets dyslexiques pour les comparer aux sujets non dyslexiques a confirmé cette observation ( $F[1,32] = 4,5$  ;  $p < 0,05$ , figure 13). En outre, la durée d'écriture des lettres n'est pas la même pour tous les mots, mais cela est plus marqué chez les dyslexiques ( $F[3,96] = 4,7$  ;  $p < 0,005$ ). Les tests post-hoc montrent que c'est sur le mot « parle » que les dyslexiques se différencient significativement des normo-lecteurs ( $p < 0,02$ ).

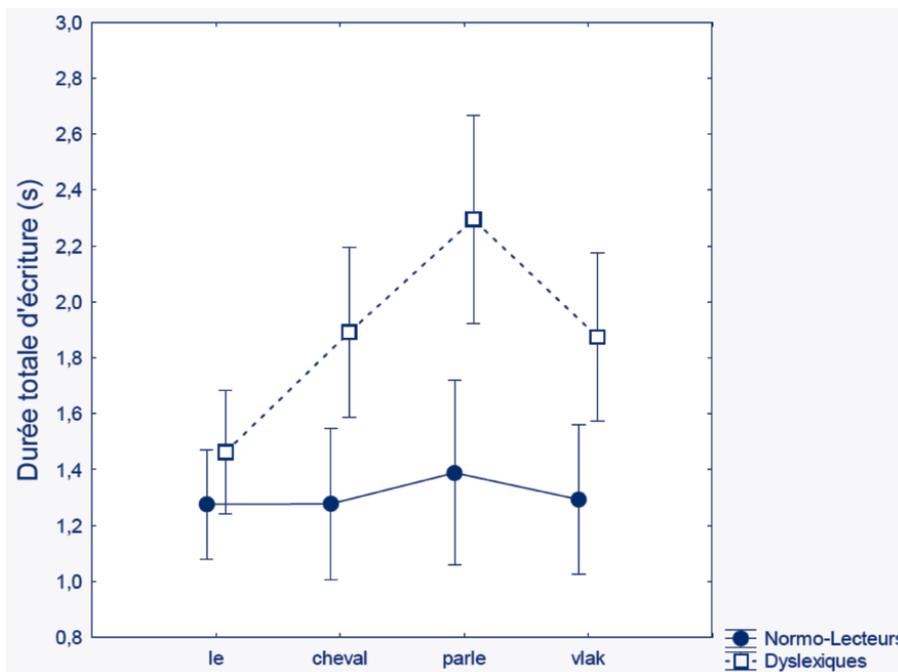


Figure 12. Durée totale d'écriture de chaque mot pour les normo-lecteurs et les dyslexiques.

#### Durée des intervalles entre les mots

Comme c'était déjà le cas pour les lettres cursives, nous avons observé que les dyslexiques (DL et DL-DG) présentent des durées d'intervalles entre les mots plus longues que les normo-lecteurs (témoins et DG). L'analyse regroupant les dyslexiques pour les comparer aux normo-lecteurs (figure 14) a confirmé cette différence au plan statistique ( $F[1,32] = 5,8 ; p < 0,03$ ). La durée des intervalles entre les mots n'est pas la même pour tous les mots et cela est plus marqué chez les dyslexiques (interaction « groupe x mot »

significative :  $F[2,64] = 3,2 ; p < 0,05$ ). La durée de l'intervalle avant « PARLE » est significativement plus longue chez les dyslexiques ( $p < 0,05$ ).

#### Durée des intervalles entre les lettres (à l'intérieur des mots)

Là encore, nous avons pu observer que l'intervalle entre les lettres est plus important dans les deux groupes contenant des enfants dyslexiques (figure 15). Comme précédemment, nous avons effectué une analyse en regroupant les sujets dyslexiques pour les comparer aux normo-lecteurs.

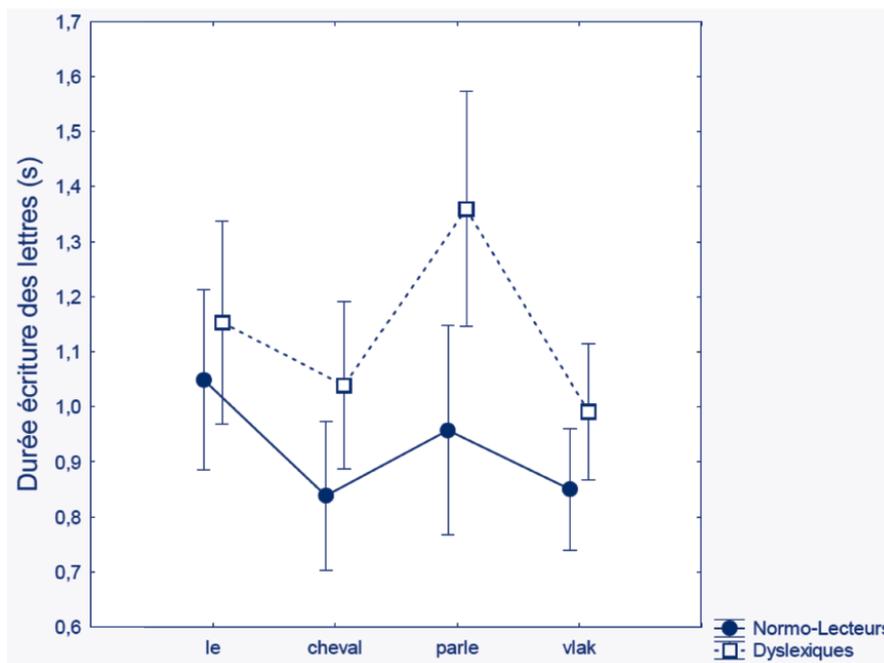


Figure 13. Durée d'écriture des lettres pour chaque mot chez les normo-lecteurs et les dyslexiques.

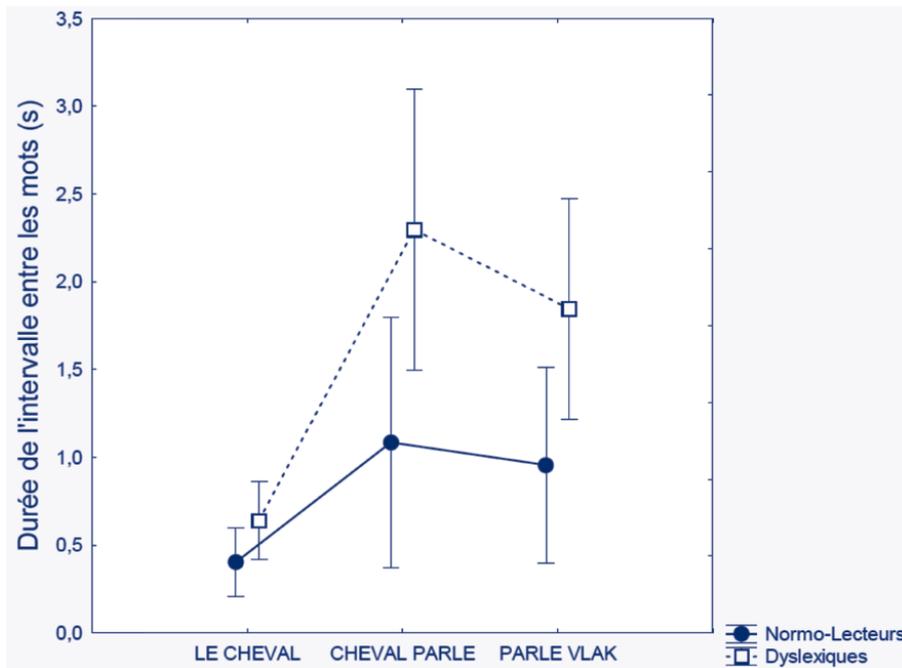


Figure 14. Durée des intervalles entre les mots chez les normo-lecteurs et les dyslexiques.

Cette analyse a confirmé que la durée des intervalles entre les lettres est plus longue chez les dyslexiques ( $F[1,32] = 10,8$  ;  $p < 0,005$ ) et elle a mis en évidence une interaction groupe par mot significative ( $F[3,96] = 4,6$  ;  $p < 0,005$ ) qui indique que la durée des intervalles entre les lettres n'est pas la même pour tous les mots, mais seulement chez les dyslexiques. Les tests *post-hoc* montrent que les dyslexiques ont des durées d'intervalles entre les lettres significativement plus longues que les non dyslexiques dans « PARLE »

( $p < 0,01$ ), dans « VLAK » ( $p < 0,02$ ) et dans « CHEVAL » ( $p < 0,08$ ).

## Discussion

### Vitesse d'écriture

Aussi bien en écriture cursive qu'en majuscules, la vitesse de tracé des mots, c'est-à-dire la vitesse d'écriture proprement dite, n'est pas différente

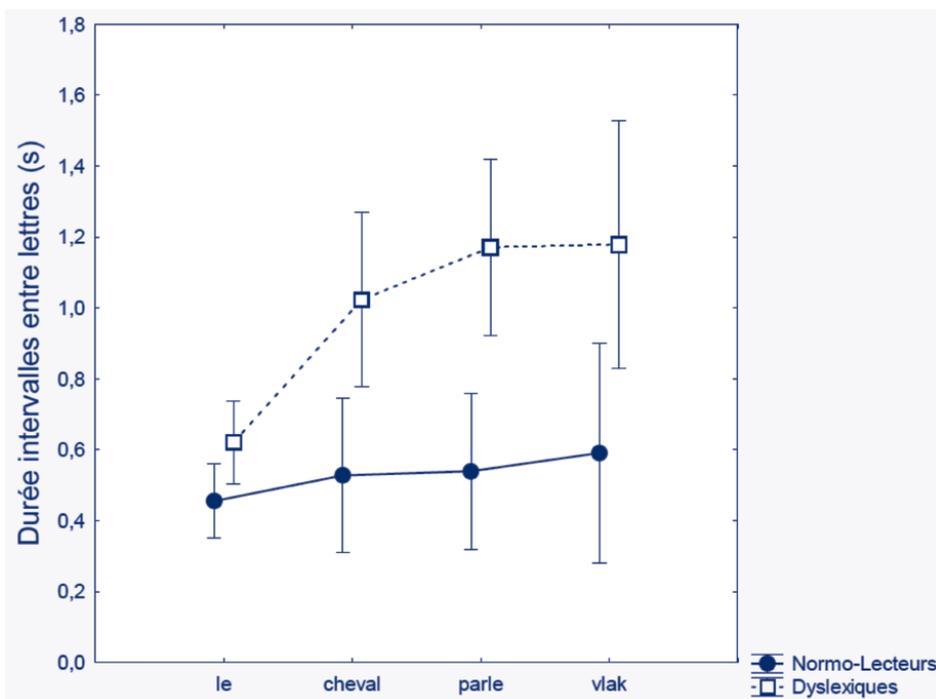


Figure 15. Durée des intervalles entre les lettres de chaque mot chez les normo-lecteurs et les dyslexiques.

entre les quatre groupes expérimentaux. Autrement dit, les dyslexiques et les dysgraphiques ne sont pas plus lents à tracer les lettres et les mots que les enfants témoins. Ce résultat confirme, pour l'écriture d'une phrase courte, ce qui avait été observé pour l'écriture d'un mot isolé (Paz-Villagran *et al.*, 2011).

### **Durée d'écriture et durées des levers**

La durée d'écriture est un reflet direct de la vitesse de tracé s'il n'y a pas, ou peu, de levers dans les mots. C'est le cas pour l'écriture cursive pour laquelle la durée d'écriture des mots n'est pas différente d'un groupe à l'autre. En revanche, en majuscules il y a de nombreux levers dans les lettres et entre les lettres et la durée d'écriture ne reflète plus uniquement le processus de tracé. De façon très intéressante, les dyslexiques qui tracent à la même vitesse que les témoins perdent du temps dès qu'il y a des levers entre les segments tracés. Cela est clair en majuscules où ils sont plus longs que les autres pour tracer les lettres et les mots. On peut supposer que ce sont les levers qui sont générateurs de temps perdu chez les dyslexiques. Deux types de levers sont présents dans les mots en majuscules : les levers entre lettres et les levers éventuels à l'intérieur de chaque lettre. La perte de temps peut s'expliquer par l'un ou les deux types de levers, mais nous n'avons pas analysé les levers intra-lettres. En fait, les durées entre les lettres sont effectivement plus importantes chez les DL et les durées d'écriture des lettres également. Comme la vitesse d'écriture est la même que celle des autres enfants, on peut supposer que ce sont les levers intra-lettres qui sont plus longs. De surcroît, en majuscules comme en cursives, les dyslexiques ont des durées d'intervalles entre les mots plus longues que celles des normo-lecteurs. Pour conclure, les enfants dyslexiques perdent du temps dans tous les levers qu'ils effectuent pour écrire et cela se traduit par une production de texte plus lente que celle des témoins et des dysgraphiques surtout dans l'écriture en majuscules.

### **Influence du mot à écrire**

En cursives comme en majuscules, la durée d'écriture était plus longue pour certains mots, en particulier lorsque les enfants ont écrit le pseudo-mot « vlak ». Curieusement, en cursives, cet allongement n'est pas plus important pour les dyslexiques et les dysgraphiques que pour les enfants témoins, ce qui suggère davantage un ralentissement dû à la nouveauté graphomotrice qu'à un problème dans l'orthographe du mot. Au

plan graphomoteur, la difficulté à écrire « vlak » peut en effet résulter de deux causes non mutuellement exclusives :

- les lettres de « vlak » sont difficiles à écrire, en particulier la lettre « k » qui est peu fréquente et complexe,
- enchaîner ces quatre lettres peut être difficile, en particulier « vl » et « ak » qui sont des digrammes peu fréquents dans la langue française.

Les enfants dyslexiques ont des levers plus longs avant d'écrire le pseudo-mot. Cette perte de temps relève sans doute des difficultés d'orthographe chez les dyslexiques qui hésitent davantage avant d'écrire les mots.

### **Conclusion**

Pour conclure, les résultats de cette étude montrent que les dyslexiques semblent avoir des difficultés spécifiques dans la gestion des levers qui sont requis dans l'écriture, en particulier pour l'écriture manuscrite. Ce déficit pourrait ressortir d'un problème d'apprentissage procédural dans la mesure où les levers séparent les différents éléments d'une séquence de mouvements graphiques. Notre protocole expérimental ne nous permet pas de conclure de façon définitive à un déficit d'apprentissage procédural chez les dyslexiques car comme nous n'avons fait répéter les phrases qu'à cinq reprises, il n'y a pas eu d'apprentissage à proprement parler. On aurait pu envisager de mettre en place une expérimentation longitudinale avec des entraînements multiples lors de sessions d'apprentissage espacées. Des études montrent en effet qu'il peut y avoir des changements de performances au fil du temps, donc que l'apprentissage procédural doit être évalué sur une plus longue durée (Orban *et al.*, 2008). Néanmoins, les résultats observés confirment l'hypothèse de départ concernant l'existence d'un trouble de l'automatisation de l'écriture spécifique à la dyslexie, et vont dans le sens de la théorie du déficit d'apprentissage procédural à l'origine des troubles des apprentissages. Les auteurs de cette théorie récente admettent qu'elle a des limites et que le modèle qu'elle propose est amené à évoluer (Nicolson et Fawcett, 2011).

Il y a un certain nombre de limites à cette étude qui ne peut être considérée que comme préliminaire. Une limite importante à l'heure actuelle est le faible effectif du groupe des dysgraphiques normo-lecteurs (DG, 4 enfants seulement) car l'interprétation repose sur le fait que ce groupe ne se différencie pas des témoins. Il serait donc essentiel de confirmer ces résultats préliminaires avec un groupe numériquement plus important. Autre limite, les résultats de cette étude ne portent

que sur les variables temporelles. Or, l'analyse des variables spatiales aurait pu conduire à d'autres résultats, en particulier en ce qui concerne les dysgraphiques. Il serait intéressant de procéder au traitement des variables spatiales pour caractériser plus précisément l'écriture des dysgraphiques, qui ne se distinguent pas des témoins lors de cette étude portant sur les variables temporelles. En effet, des études précédentes ont montré que la variabilité spatiale est caractéristique surtout de l'écriture des dysgraphiques (Van Galen, 1991 ; Velay *et al.*, 2009).

Nous n'avons pas pu conclure définitivement si les durées plus longues des intervalles entre les lettres et entre les mots chez les dyslexiques sont dues à un trouble phonologique et/ou orthographique, ou à un trouble de la programmation du schéma moteur des lettres. Un protocole expérimental dans lequel la même tâche d'écriture serait comparée à une tâche d'écriture plus simple au plan linguistique (un même caractère reproduit autant de fois qu'il y a de lettres dans chaque mot de la phrase, par exemple), permettrait de mieux comprendre de quoi relèveraient précisément les troubles de l'écriture. Des études s'intéressent déjà à cette distinction et suggèrent, à travers des observations cliniques, que les programmes moteurs des lettres sont instables chez les dyslexiques en raison de leurs difficultés orthographiques (Berninger *et al.*, 2008).

En dernier lieu, compte tenu de l'hétérogénéité des troubles dyslexiques, on ne peut pas écarter tous les symptômes présents dans la dyslexie, tels que les troubles visuo-attentionnels, les troubles phonologiques et les troubles mnésiques (Chaix *et al.*, 2007 ; Viholainen *et al.*, 2010). Le recrutement des sujets participant à notre étude n'a pas

pu aboutir à un regroupement des dyslexiques en fonction du type de dyslexie. Il serait intéressant de spécifier si les troubles de l'écriture sont visibles dans tous les types de dyslexie en précisant les profils des sujets dyslexiques inclus. Cela permettrait de préciser le cadre théorique explicatif de l'étiologie de la dyslexie.

## Conclusion générale

Cette revue des recherches les plus récentes concernant les troubles d'apprentissage de l'enfant nous montre assez clairement l'intrication entre fonctions motrices et fonctions cognitives sur les plans anatomo-fonctionnel et développemental et nous permet de mieux appréhender l'hétérogénéité des tableaux cognitifs observés en pratique clinique. Il nous paraît intéressant d'aborder dans l'avenir les troubles d'apprentissage en termes de profils cognitifs et d'utiliser une terminologie clinique plus précise et plus adéquate pour caractériser les troubles observés. Nous avons également besoin d'outils diagnostiques plus appropriés pour mieux étayer nos observations et ceux-ci ne peuvent être élaborés que par une collaboration entre chercheurs et cliniciens. L'enregistrement par les tablettes graphiques de variables spatio-temporelles nous fournit des données objectives sur le processus d'écriture et permet d'émettre des hypothèses quant aux mécanismes à l'origine des troubles d'écriture observés dans divers troubles développementaux, en particulier la dyslexie. Le développement de son utilisation dans une pratique courante pourrait avoir un intérêt diagnostique mais également thérapeutique. Des prises en charge plus adaptées devraient en résulter.

## Références bibliographiques

- Albaret J.-M., de Castelnau P. (2009). Place des troubles de la motricité dans les troubles spécifiques du langage oral. *Développements*, 1, 5–13.
- American Psychiatric Association (2003). *DSM-IV-TR, Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux*, 4<sup>e</sup> édition. Paris : Masson.
- Bailleux H., De Smet H. J., Paquier P., De Deyn P., Mariën P. (2008). Cerebellar neurocognition: Insights into the bottom of the brain. *Clinical Neurology and Neurosurgery*, 110 (8), 763–773.
- BALE, groupe Cogni-sciences, laboratoire de psychologie et neuro cognition, 2010.
- Basse I., Albaret J.-M., Chaix Y. (1999). Troubles psychomoteurs et dyslexie. *Évolutions psychomotrices*, 46, 207–213.
- Beecham Y., Cariou S. (2011–2012). Troubles de l'automatisation de séquences graphomotrices chez les enfants dyslexiques. *Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du certificat de capacité d'Orthophonie*. Université d'Aix-Marseille.
- Berninger V., Nielsen K., Abbott R., Wisjman E., Raskind W. (2008). Writing problems in developmental dyslexia : under-recognized and under-treated. *Journal of School Psychology*, 46 (1): 1–21.

- Bishop D. V.M. (2002). Motor immaturity and specific speech and language impairment. Evidence for a common genetic basis, *American Journal of Medical Genetics (Neuropsychiatrics Genetics)* 114, 56–63.
- Boada R., Pennington B. F. (2006). Deficient implicit phonological representations in children with dyslexia. *Journal of Experimental Child Psychology*, 95, 153–193.
- Bosse M. L., Tainturier M., Valdois S. (2007). Developmental dyslexia. The visual attention span deficit hypothesis. *Cognition*, 104, 198–230.
- Brookes R. L., Tinkler S., Nicolson R. I., Fawcett A. J. (2010). Striking the right balance: motor difficulties in children and adults with dyslexia, *Dyslexia*, 16 (4), 358–373.
- Chaix Y., Albaret J. M., Brassard C., Cheuret E., de Castelneau P., Benesteau J., Karsenty C., Demonet J. F. (2007). Motor impairments in dyslexia: the influence of attention disorders. *European Journal of Paediatric Neurology*, 11, 368–374.
- Charles, M., Soppelsa R., Albaret J.-M. (2003). *BHK – Échelle d'évaluation rapide de l'écriture chez l'enfant*. Paris : Éditions et Applications Psychologiques.
- Chevrie-Muller C., Simon A.-M., Fournier S. (1997). L2MA Batterie pour l'examen psycholinguistique de l'enfant. ECPA.
- Coffin J. M., Baroody S., Schneider K., O'Neil J. (2005). Impaired cerebellar learning in children with prenatal alcohol exposure: A comparative study of eye blink conditioning in children with ADHD and dyslexia. *Cortex*, 41, 389–398.
- Denckla M. B., Rudel R. G., Chapman C., Krieger J., Motor proficiency in dyslexic children with and without attentional disorders (1985), *Archives of Neurology*, 42: 228-231.
- Di Pietro M., Schnider A., Ptak R. (2010). Peripheral dysgraphia characterized by the co-occurrence of case substitutions in uppercase and letter substitutions in lowercase writing. *Cortex*, 10, 1–16.
- Diamond A. (2000). Close interrelation of motor development and cognitive development and of cerebellum and prefrontal cortex. *Child development*, 71 (1), 44–56.
- Doyon J., Bellec P., Amsel R., Penthune V., Monchi O., Carrier J., Lehericy S., Benali H. (2009). Contributions of basal ganglia and functionally related brain structures to motor learning. *Behavioural Brain Research*, 198 (1), 61–75.
- Doyon J., Penthune V., Ungerleider L. (2003). Distinct contribution of the cortico-striatal and cortico-cerebellar systems to motor skill learning. *Neuropsychologia*, 41, 252–262.
- Eckert M., Leonard C., Richards T., Aylward E., Thomson J., Berninger V. (2003). Anatomical correlates of dyslexia: frontal and cerebellar findings. *Brain*, 126, 482–494.
- Fischer B., Gezeck S., Hartnegg K. (2000). On the production and correction of involuntary pro saccades in a gap antisaccade task. *Vision Research*, 40, 2211–2217.
- Fournier Del Castillo M., Belmonte M., Rojas M., Pino M., Verdu J., Rodriguez J. (2010). Cerebellum atrophy and development of a peripheral dysgraphia: a paediatric case. *Cerebellum*, 9, 530–536.
- Gilger J. W., Kaplan B. J. (2001). Atypical brain development: a conceptual framework for understanding developmental learning disabilities. *Developmental Neuropsychology*, 20, 465–481.
- Gillberg C. (2003). Deficits in attention, motor control and perception: a brief review. *Archives of Disease in Childhood*, 88, 904–910.
- Gubbay S. S., de Klerk N. H. (1995). A study and review of developmental dysgraphia in relation to acquired dysgraphia. *Brain and Development*, 17, 1–8.
- Guyton A. C. (1991). *Basic Neuroscience (Anatomy & Physiology)*. Saunders Company, Philadelphia.
- Habib M. (2002). Bases neurologiques des troubles spécifiques des apprentissages. *Revue Réadaptation*, 486, 16–28.
- Hamstra-Bletz L., Blöte A. W. (1993). A longitudinal study on dysgraphic handwriting in primary school. *Journal of Learning Disabilities*, 26 (10), 689–699.
- Howard J., Howard D., Japikse K., Eden G. (2006). Dyslexic are impaired on implicit higher-order sequence learning, but not on implicit spatial context learning. *Neuropsychologia*, 44: 1131-1144.
- Inserm - Expertise collective (2007). *Dyslexie, Dysorthographe, Dyscalculie: Bilan des données scientifiques*.
- Iversen S., Berg K., Ellertsen B., Tonnessen F. E. (2005). Motor coordination difficulties in a municipality group and in a clinical sample of poor readers. *Dyslexia*, 11, 217–231.
- Kaplan B., Crawford S., Cantell M., Kooistra L., Dewey D. (2006). Comorbidité, co-occurrence, continuum: what's in a name? *Child: Care, Health and Development*, 32, 723–731.
- Kaplan B., Dewey D., Crawford S., Wilson B. (2001). The term comorbidity is of questionable value in reference to developmental disorders: data and theories. *Journal of Learning Disabilities*, 34, 555–565.
- Kaiser M. L. (2009). *Facteurs endogènes et exogènes influençant l'écriture manuelle chez l'enfant*. Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse III-Paul Sabatier.
- Kirby A., Sugden D., Beveridge S., Edwards L., Edwards R. (2008). Dyslexia and developmental coordination disorder in further and higher education-similarities and differences. Does the “label” influence the support given? *Dyslexia*, 14 (3), 197–213.
- Konczak J., Timmann D. (2007). The effect of damage of the cerebellum on sensori-motor and cognitive function in children and adolescents. *Neuroscience and Biobehavioural Reviews*, 31 (8), 1101–1113.
- Lefavrais P. (2005). *Alouette-R Test d'analyse de la lecture et de la dyslexie*. ECPA

- Leonard C., Eckert M., Lombardino L., Oakland T., Kranzler J., Mohr C., King W., Freeman A. (2001). Anatomical risks factors for phonological dyslexia. *Cerebral Cortex*, 11: 148–157.
- Macoir J., Fossard M. (2008). Mémoire à long terme et langage : différenciation entre l'accès aux mots en mémoire déclarative et l'application de règles en grammaire mentale. *Spectrum* 1, 1–9.
- Maeland A.F. (1992). Handwriting and perceptual-motor skills in clumsy, dysgraphic and "normal" children. *Perceptual and Motor Skills*, 75, 1207–1217.
- Martlew M. (1992). Handwriting and spelling: dyslexic children's abilities compared with children of the same chronological age and younger children of the same spelling level. *British Journal of Educational Psychology*, 62, 375–390.
- Mather, D.S. (2003). More than written language difficulties in common. *Journal of Learning Disabilities*, 36 (4), 307–317.
- Menghini D., Hagberg G., Petrosini L., Bozzali M., Macaluso E., Caltagirone C., Vicari S. (2008). Structural correlates of implicit learning deficits in subjects with developmental dyslexia. *Annals of New York Academy of Sciences*, 1145, 212–221.
- Moe-Nilssen R., Helbostad J. L., Talcott J. B., Tonnessen F. E. (2003). Balance and gait in children with dyslexia. *Experimental Brain Research*, 150:237–244.
- Nicolson R., Fawcett A. (2007). Procedural learning difficulties: reuniting the developmental disorders? *Trends in Neurosciences*, 30, 135–141.
- Nicolson R., Fawcett A. (2011). Dyslexia, dysgraphia, procedural learning and the cerebellum. *Cortex*, 47, 117–127.
- Nicolson R., Fawcett A. (1990). Automaticity: a new framework for dyslexia research? *Cognition*, 35, 159–182.
- Nicolson R., Fawcett A. (1992). Automatisatation deficits in balance for dyslexic children. *Perceptual and Motor Skills*, 75, 507–529.
- Nicolson R., Fawcett A., Berry E., Jenkins I., Dean P., Brooks D. (1999). Association of abnormal activation with motor learning difficulties in dyslexic adults. *Lancet*, 353: 1662–1667.
- Nicolson R., Fawcett A., Dean P. (1996). Impaired performance of children with dyslexia on a range of cerebellar tasks. *Annals of Dyslexia*, 46, 259–283.
- O'Hare A., Khalid S. (2002). The association of abnormal cerebellar function in children with developmental coordination disorder and reading difficulties. *Dyslexia*, 8 (4), 234–248.
- Orban P., Lungu O., Doyon J. (2008). Motor sequence learning and developmental dyslexia. *Annals of New York Academy of Sciences*, 1145, 151–172.
- Orban P., Peigneux P., Lungu O., Debas K., Barakat M., Bellec P., Benali H., Maquet P., Doyon J. (2011). Functional neuroanatomy associated with the expression of distinct movement kinematics in motor sequence learning. *Neuroscience*, 10, 1–40.
- Paz-Villagran V., Gilhodes J.-C., Velay J.-L. (2011). Are dysgraphic children really slower than proficient hand-writers? *Proceedings of the 15th Conference of the international Graphonomics Society, Contreras-Vidal, P.P. (Ed)*, 42–45.
- Peereman R., Lété B., Sprenger-Charolles L. (2007). Manulex-infra: Distributional characteristics of grapheme-phoneme mappings, infra-lexical and lexical units in child-directed written material. *Behavior Research Methods*, 39 :593–603.
- Piek J. P., Murray J.D. (2004). Sensory-motor deficits in children with developmental coordination disorder, attention deficit hyperactivity disorder and autistic disorder. *Human Movement Science*, 23 (3–4), 475–488.
- Pothier B., Pothier P. (2003). ÉOLE Échelle d'acquisition en orthographe lexicale. Retz.
- Purcell J. J., Turkeltaub P. E., Eden G. F., Rapp B. (2011). Examining the central and peripheral processes of written word production through meta-analysis. *Frontiers in Psychology*, 2 (239), 1–16.
- Rae C., Harasty J., Dzendrowskyj T., Talcott J., Simpson J., Blamire A. (2002). Cerebellar morphology in developmental dyslexia. *Neuropsychologia*, 40, 1285–1292.
- Ramus F., Pidgeon E., Frith U. (2003). The relationship between motor control and phonology in dyslexic children. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 44, 712–722.
- Ramus F., White S., Milne E., Rosen S., Hansen P., Swettenham J., Frith U. (2006). The role of sensorimotor impairment in dyslexia: a multiple case study of dyslexic children. *Developmental Science*, 9, 237–269.
- Rechetnikov R. P., Maitra K. (2009). Motor impairments in children associated with impairments of speech or language: a meta-analytic review of research literature. *American Journal of Occupational Therapy*, 63, 255–263.
- Rosenblum S., Dvorkin A., Weiss P. (2006). Automatic segmentation as a tool for examining the handwriting process of children with dysgraphic and proficient handwriting. *Human Movement of Science*, 25, 608–621.
- Rosenblum S., Weiss P., Parush S. (2004). Handwriting evaluation for developmental dysgraphia: Process versus product. *Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal*, 17, 433–458.
- Rosenblum S., Weiss P., Parush S. (2003). Product and Process Evaluation of Handwriting Difficulties. *Educational Psychology Review*, 15: 41–81.
- Schoemaker M.M., van-der-Wees M., Flapper B., Verheij-Jansen N., Scholten-Jaegers S., Geuze R.H. (2001). Perceptual skills of children with Developmental Coordination Disorder. *Human Movement Science*, 20, 111–133.
- Shanahan M. A., Pennington B. F., Yeris B. E., Scott A., Boada R., Willcutt E. G., (2006) Processing speed deficits

- in attention deficit/hyperactivity disorder and reading disability. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 34, 585-602.
- Smits-Engelsman B. C. M., Van Galen G. P. (1997). Dysgraphia in children: Lasting psychomotor deficiency or transient developmental display. *Journal of Experimental Child Psychology*, 67, 164-184.
- Sovik N., Arntzen O., Thysgesen R. (1987). Relation of spelling and writing in learning disabilities. *Perceptual and Motor Skills*, 64(1), 219-236.
- Sprenger-Charolles L., Colé P., Laceret P., Serniclaes W. (2000). On subtypes of developmental dyslexia: Evidence for processing time and accuracy scores. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 54(2), 87-103.
- Stein J. (2001). The magnocellular theory of developmental dyslexia. *Dyslexia*, 7(1), 12-36.
- Stoodley C., Schmahmann J. (2010). Evidence for topographic organization in the cerebellum of motor control versus cognitive and affective processing. *Cortex*, 46 (7), 831-844.
- Stoodley C., Stein J. (2011). The cerebellum and dyslexia. *Cortex*, 47:101-116.
- Stoodley C., Ray N., Jack A., Stein F. (2008). Implicit learning in control, dyslexic and garden-variety poor readers. *Annals of New York Academy of Sciences*, 1145, 173-183.
- Ullman M., Pierpont E. (2005). Specific language impairment is not specific to language: the procedural deficit hypothesis. *Cortex*, 41, 399-433.
- Van Gale G. P. (1991). Handwriting: issues for a psychomotor theory. *Human Movement Science*, 10, 165-191.
- Velay J.-L., Henin F., Moulin C., Thomas T., Devos-Charles I., Habib M. (2009). Handwriting variability in children writing letters: a study in dyslexic, dysgraphic and proficient handwriters. *Advances in Graphonomics*, Proceedings of the 14th Biennial Conference of the International Graphonomic Society (pp. 91-94).
- Vicari S., Marotta L., Menghini D., Molinari M., Petrosini L. (2003). Implicit learning deficit in children with developmental dyslexia. *Neuropsychologia*, 41: 108-114.
- Viholainen H., Aro M., Ahonen T., Crawford S., Cantell M., Kooistra L. (2010). Are balance problems connected to reading speed or the familial risk of dyslexia? *Developmental medicine and child neurology*, 53: 350-353.
- Volman M.J.M., van Schendel B.M., Jongmans M.J. (2006). Handwriting difficulties in primary school children: A search for underlying mechanisms. *American Journal of Occupational Therapy*, 60, 451-460.
- Wimmer H., Mayringer H., Raberger T., Reading and dual-task balancing: evidence against the automatization deficit explanation of developmental dyslexia (1999), *Journal of Learning Disabilities* 32: 473-8.
- Zesiger P. (2003). Acquisition et troubles de l'écriture. *Enfance*, 55(1), 56-64.
- Zesiger P. (1995). *Écrire : approches cognitive, neuropsychologique et développementale*. Paris : Presses universitaires de France.
- Zorzi M., Barbiero C., Facoetti A., Lonciari I., Carrozzi M., Montico M., Bravar L., George F., Pech-Georgel C., Ziegler J. C. (2012). Extra-large letter spacing improves reading in dyslexia, PNAS June 4, 2012 201205566.