

GraphoGame : un outil numérique pour enfants en difficultés d'apprentissage de la lecture

J.-P. RUIZ*, J. LASSAULT*, L. SPRENGER-CHAROLLES*, U.A RICHARDSON**,
H. LYYTINEN***, J.C. ZIEGLER*

* Aix-Marseille Université et CNRS, Laboratoire de psychologie cognitive (UMR 7290), Fédération de recherche 3C, Marseille, France. Auteur de correspondance : Johannes Ziegler, Laboratoire de psychologie cognitive, Aix-Marseille Université, 3, place Victor-Hugo, Bât 9, Case D, 13331 Marseille Cedex 3, France. Tél. : +33413550997. Email : Johannes.ziegler@univ-amu.fr

** University of Jyväskylä, Centre for Applied Language Studies, Jyväskylä, Finlande.

*** UNESCO Chair on Inclusive Literacy Learning for All, University of Jyväskylä, Jyväskylä, Finlande.

RÉSUMÉ : GraphoGame : un outil numérique pour enfants en difficultés d'apprentissage de la lecture

Un enseignement systématique des relations graphophonologiques (le décodage) est nécessaire pour apprendre à lire. Des outils numériques, tel que GraphoGame, un logiciel audiovisuel finlandais, peuvent faciliter la mise en place et l'automatisation du décodage. L'article présente une adaptation en français de GraphoGame sur tablette qui tient compte de l'orthographe de cette langue. Un premier essai de validation, qui a été effectuée auprès d'enfants de CP et CE1 à risques de dyslexie, a permis de constater une progression en lecture de mots plus importante après l'entraînement GraphoGame qu'après un entraînement non-informatisé ou un entraînement mathématique informatisé. Ces premiers résultats suggèrent que les outils du type GraphoGame présentent un intérêt pour les enfants à risque de dyslexie.

Mots clés : Dyslexie – Remédiation – GraphoGame – Numérique – École.

SUMMARY: GraphoGame: a digital tool for children with difficulties in learning-to-read

The systematic teaching of spelling-to-sound relations (decoding) is necessary for learning to read. Digital tools such as GraphoGame, a Finnish audio-visual reading game, can facilitate the initiation and automatization of the decoding process. This article presents a French adaptation of GraphoGame for smartphones and tablets. This adaptation implements a psycholinguistic progression that takes into account orthographic, phonological and lexical properties of the French language. A randomized control trial, which was conducted with 1st and 2nd grade children at risk for dyslexia, showed greater benefits in the reading of words after GraphoGame training than after a non-computerized training or a computerized math training. These first results suggest that computerized tools, such as GraphoGame, are beneficial for children at risk for dyslexia.

Key words: Dyslexia – Intervention – GraphoGame – Digital tools – School.

RESUMEN: El GraphoGame: un instrumento numérico para niños con dificultades de aprendizaje de la lectura

La enseñanza sistemática de la relaciones entre ortografía y sonido (decodificación) es necesaria para aprender a leer. Las herramientas digitales como GraphoGame, un programa de lectura audiovisual en finlandés, pueden facilitar la iniciación y automatización del proceso de decodificación. Este artículo presenta una adaptación francesa de GraphoGame para tabletas teniendo en cuenta las propiedades ortográficas, fonológicas y lexicales del francés. Una primera validación con niños de primer y segundo grado de Primaria con riesgo de dislexia, mostró que un entrenamiento de lectura con GraphoGame representa un mayor beneficio para la lectura de palabras que un entrenamiento de lectura no informatizado o un entrenamiento matemático informatizado. Estos resultados iniciales sugieren que las herramientas informatizadas, como GraphoGame, son beneficiosas para niños con riesgo de dislexia.

Palabras clave: Dislexia – Intervención – GraphoGame – Herramientas digitales – Escuela.

Pour citer cet article : RUIZ, J.-P., LASSAULT, J., SPRENGER-CHAROLLES, L., RICHARDSON, U.A, LYYTINEN, H. & ZIEGLER, J.C. (2017). GraphoGame : un outil numérique pour enfants en difficultés d'apprentissage de la lecture. *A.N.A.E.*, 148, 333-343.

INTRODUCTION

La lecture est un processus complexe qui fait appel à au moins deux composantes (Aaron, Joshi, Gooden & Bentum, 2008). D'une part, l'identification des mots écrits qui est un processus spécifique à la lecture. D'autre part, la capacité à effectuer un traitement sémantique pour la compréhension de ce qui est lu. La compréhension, qui s'appuie sur plusieurs habilités (traitements sémantique, syntaxique, morphologique), n'est pas spécifique à la lecture. L'identification du mot écrit nécessite un apprentissage fondamental. Le décodage graphophonologique, à voix haute, en constitue l'entrée, et représente un prérequis indispensable pour pouvoir ensuite accéder à une reconnaissance automatique des mots écrits (Share, 1995).

L'apprentissage de la lecture pose de sérieux problèmes pour de nombreux enfants. En France, à l'école primaire, environ 250 000 enfants souffrent de problèmes d'apprentissage de la lecture. En 2015, 40 % des élèves étaient en difficulté à la sortie de l'école primaire : ils n'étaient pas en capacité d'identifier le sujet principal d'un texte, de comprendre des informations implicites et de lier deux informations explicitées séparées dans le texte (CEDRE, 2015). L'illettrisme chez les adultes est évalué en France à 3,1 millions d'individus, et les récentes études de l'OCDE (OECD, 2014) montrent que 40,5 % des élèves de 15 ans ne maîtrisent pas la lecture ; 21,5 % sont même en grande difficulté. Les écarts de niveau entre les élèves les plus performants et les moins performants sont très importants. De la même façon, l'INSERM (2007) a montré que 20 à 25 % des élèves d'une tranche d'âge sont en échec scolaire. Pourtant, le niveau d'éducation est un facteur essentiel puisqu'il prédit le mieux l'état de santé d'une population (INSERM, 2007).

Les conséquences de ces difficultés peuvent être dramatiques et ont un coût personnel et sociétal (Beddington *et al.*, 2008). Il semble donc primordial d'intervenir en cas de difficultés au plus tôt au sein de l'école auprès de ces enfants dits « à risque de dyslexie ». L'utilisation d'outils pédagogiques informatisés peut être l'une des réponses pour venir renforcer l'enseignement classique (Ecalte, Magnan, Bouchafa & Gombert, 2009 ; Girard, Ecalte & Magnan, 2013 ; Magnan, Ecalte, Veuillet & Collet, 2004 ; Potocki, Magnan & Ecalte, 2015). Ces dernières années, plusieurs outils ont été développés dont Grapho-Game (GG). GG est un outil numérique d'entraînement à la lecture développé en Finlande par Heikki Lyytinen et ses collaborateurs de l'université de Jyväskylä (Ojanen *et al.*, 2015 ; Richardson & Lyytinen, 2014). Il repose sur la présentation simultanée et répétée d'unités linguistiques en modalité auditive et visuelle. Notre article présente l'adaptation de cet outil à la langue française et une première validation à petite échelle lors d'une expérimentation auprès d'enfants, scolarisés au CP et au CE1. L'originalité de cette étude réside donc dans le fait de pouvoir tester l'outil GG en première intention à l'école, c'est-à-dire auprès d'enfants à « risque de dyslexie » pendant le temps d'activité pédagogique complémentaire.

L'APPRENTISSAGE DE LA LECTURE

La lecture est une invention culturelle récente qui nécessite tout d'abord un apprentissage explicite des règles de correspondance entre des formes écrites, les graphèmes, et leur forme sonore, les phonèmes : c'est le décodage. Ce décodage, à voix haute, permet à l'enfant de lire des mots écrits même s'il ne les a jamais vus avant, mais dont il connaît déjà la forme phonologique et la signification (Share, 1995 ; Ziegler & Goswami, 2006). La conclusion d'une méta-analyse du *National Reading Panel (National Institute of Child Health and Human Development, 2000)* montre l'importance du décodage en phase initiale de l'apprentissage de la lecture pour devenir un bon lecteur. Cet apprentissage est plus ou moins long en fonction des relations entre graphème et phonème (Ziegler & Goswami, 2005). Ainsi lorsque cette relation entre graphème et phonème est régulière, comme par exemple en finnois, chaque graphème correspond à un seul phonème et l'apprentissage de la lecture se fait en quelques semaines. En revanche, lorsque cette relation est moins régulière comme en anglais, le même graphème peut se prononcer différemment (comme 'a' dans 'cat', 'lady', 'cake', 'car') et l'apprentissage peut prendre quelques années (Landerl, Wimmer & Frith, 1997). Le français est une langue ayant un niveau de difficulté intermédiaire, relativement régulière dans le sens de la lecture mais beaucoup moins régulière dans le sens de la transcription orthographique (Peereman, Lété & Sprenger-Charolles, 2007 ; Ziegler, Jacobs & Stone, 1996).

Dans une écriture régulière, l'aisance du décodage se manifeste très concrètement par le temps de lecture du mot. Chez un lecteur débutant, ce temps est très long et directement lié à la longueur du mot et mobilise toutes les ressources cognitives de l'enfant (Zoccolotti *et al.*, 2005). L'automatisation est donc primordiale pour libérer des ressources nécessaires pour effectuer le traitement sémantique. C'est un processus progressif (Sprenger-Charolles, Siegel, Bechennec & Serniclaes, 2003) qui se caractérise par le passage d'un mode sériel, où les mots sont lus graphème par graphème, à un mode parallèle de la lecture, où tous les graphèmes sont traités de façon simultanée (Ans, Carbonnel & Valdois, 1998 ; New, Ferrand, Pallier & Brysbaert, 2006 ; Perry, Ziegler & Zorzi, 2007). Ce passage vers une lecture fluide et instantanée résulte de plusieurs mécanismes :

- un décodage de plus en plus performant permettant un accès rapide à la forme phonologique des mots (Ziegler, Perry & Zorzi, 2014),
- un traitement orthographique de plus en plus efficace permettant un accès rapide à la forme orthographique des mots (Grainger, Dufau & Ziegler, 2016 ; Ziegler, Bertrand, Lété & Grainger, 2014),
- un traitement des unités morphologiques porteuses de sens qui facilite l'accès à la signification des mots (Beyersmann, Grainger, Casalis & Ziegler, 2015 ; Cavalli, Colé, *et al.*, 2016).

La lecture quotidienne pendant l'enfance est le principal facteur permettant de parvenir à cette automatisation à l'adolescence (Cunningham & Stanovich, 1997) : chaque fois que l'enfant décode un mot, il renforce la forme orthographique, la forme phonologique et les couplages entre les deux (couplage orthographe/phonologie et couplage phonologie/orthographe). C'est donc l'apprentissage explicite du décodage, puis l'utilisation répétée de ces connaissances pendant la lecture (auto-apprentissage) qui permet à l'enfant de devenir un lecteur fluide et autonome (Cunningham, Perry, Stanovich & Share, 2002 ; Share, 1995 ; Ziegler, Perry *et al.*, 2014).

LA DYSLEXIE

Lors de ce processus d'apprentissage de la lecture, un enfant peut rencontrer des difficultés pour différentes raisons (Gabrieli, 2009 ; Norton, Beach & Gabrieli, 2015 ; Ramus, 2001 ; Stein, 2014 ; Ziegler *et al.*, 2008) (pour une revue voir Habib & Ziegler, 2016). La dyslexie développementale serait l'extrémité d'un continuum des difficultés de lecture. Elle se traduit par un retard de lecture important malgré une stimulation normale, une intelligence normale, l'absence de difficultés sensorielles ou cognitives. Selon les différentes sources, sa prévalence en France varie entre 3,5 % et 8 % (Billard *et al.*, 2009 ; Habib, 2014 ; Sprenger-Charolles & Colé, 2003) ; elle peut atteindre des niveaux plus élevés dans les milieux socio-économiques défavorisés (Fluss *et al.*, 2008).

Si l'origine génétique et neurobiologique est largement admise (Norton *et al.*, 2015), plusieurs hypothèses explicatives sont encore débattues et ce numéro donne un excellent aperçu de la diversité de ces explications. Sans aucun doute, l'une des hypothèses largement partagée concerne la théorie phonologique qui selon les travaux expérimentaux montre un double déficit (Sprenger-Charolles & Colé, 2013 ; Sprenger-Charolles, Siegel, Jimenez & Ziegler, 2011). Le premier serait relié aux compétences d'analyse phonémique et de mémoire phonologique à court terme qui entraveraient le décodage et l'assemblage des unités phonémiques. Le second serait relié à l'accès lexical qui entraverait la récupération rapide des informations phonologiques. Avec un traitement phonologique perturbé, le mécanisme du décodage ne peut se mettre en place efficacement ce qui rend l'apprentissage de la lecture et l'automatisation extrêmement difficiles (pour des simulations de ce déficit voir Ziegler, Perry *et al.*, 2014).

Une deuxième théorie concerne les traitements visuels et visuo-attentionnels qui peuvent être déficitaires chez certains enfants dyslexiques (Bosse, Tainturier & Valdois, 2007 ; Stein, 2014 ; Vidyasagar & Pammer, 2010). Il est évident qu'une lecture fluide nécessite un traitement orthographique efficace. Si l'empan visuo-attentionnel est trop réduit, le traitement parallèle des lettres devient impossible tout comme l'exploitation des informations parafovéales (Bosse *et al.*, 2007 ; mais voir Ziegler, Pech-Georgel, Dufau & Grainger, 2010). Si le codage de la position des

lettres est déficitaire (Collis, Kohnen & Kinoshita, 2013) possiblement dû à des déficits de la voie magnocellulaire (*e.g.* Stein, 2014), le mécanisme de décodage est perturbé et l'apprentissage orthographique est fortement affecté (pour des simulations de ce déficit voir Ziegler, Perry, *et al.*, 2014). Si le traitement visuo-attentionnel est déficitaire, l'enfant peut souffrir d'un encombrement perceptif plus important (Zorzi *et al.*, 2012) et/ou d'un guidage oculomoteur perturbé. Bien que la question de l'indépendance et de la prévalence de ces déficits fasse toujours débat (Saksida *et al.*, 2016), il semble aujourd'hui clair que les causes de la dyslexie sont multifactorielles (Menghini *et al.*, 2010 ; Pennington, 2006 ; van Bergen, van der Leij & de Jong, 2014).

GRAPHOGAME

GraphoGame (GG) est un logiciel d'entraînement audiovisuel qui présente des stimuli auditifs et des choix orthographiques (voir *figure 1*) à différentes tailles d'unités (phonème, syllabe, rimes, mots, phrases). À ce titre, le logiciel renforce tout d'abord la perception auditive, l'accès aux représentations phonologiques et la discrimination phonémique et phonologique. Puis il travaille la mise en relation entre les unités phonologiques et orthographiques (le décodage). Enfin, il renforce directement le traitement orthographique et le codage de la position des lettres. Grâce à la répétition massive, le logiciel a pour but de stabiliser le codage orthographique et phonologique et de renforcer l'automatisation du couplage entre ces deux codes. GG s'attaque donc directement aux domaines qui sont souvent déficitaires chez les enfants dyslexiques ou chez les enfants à risque.

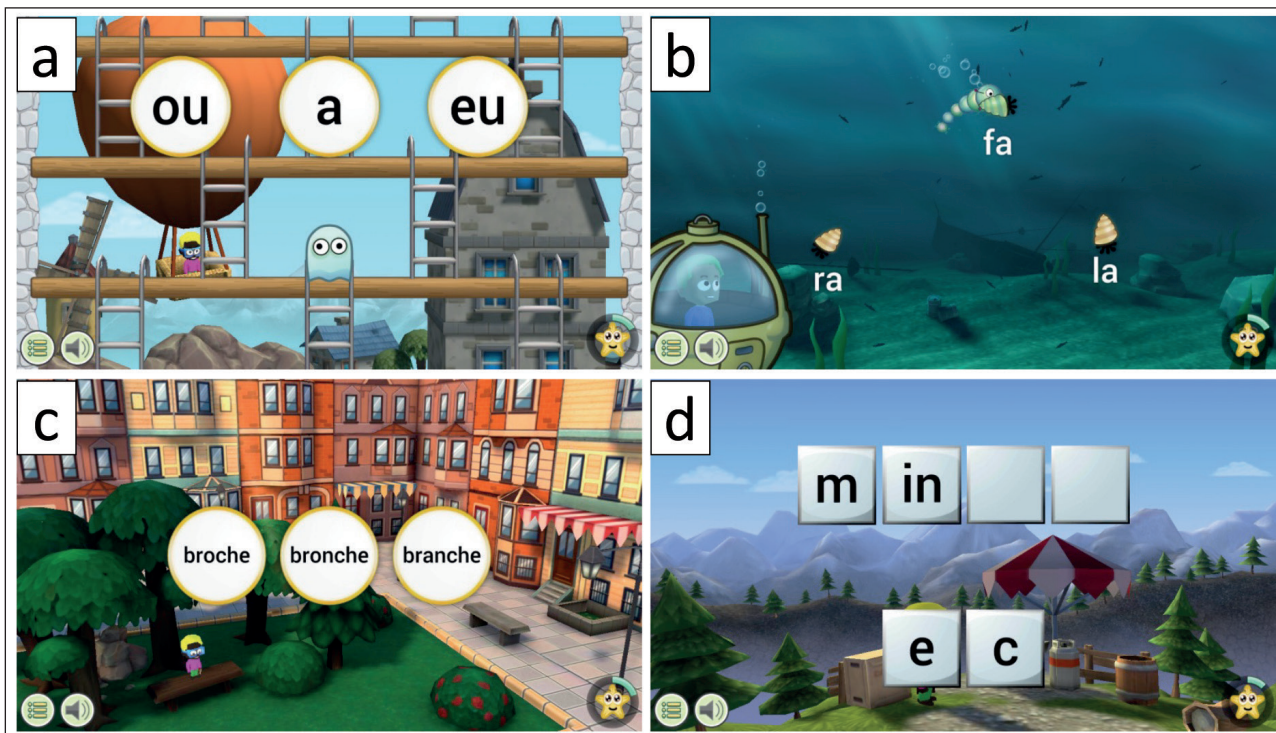
L'efficacité de la version finlandaise de GG a déjà été mise en évidence en Finlande auprès d'enfant âgés de 7 ans considérés à « risque de dyslexie » (Saine, Lerkkanen, Ahonen, Tolvanen & Lyytinen, 2010). Les enfants ayant suivi l'entraînement GG ont montré des progrès significatifs en décodage et en orthographe par rapport à un groupe contrôle ayant suivi une remédiation classique sans le logiciel. Des résultats similaires ont été obtenus pour l'anglais (Kyle, Kujala, Richardson, Lyytinen & Goswami, 2013).

Adaptation de Graphogame à la langue française

L'adaptation française de GG a tenu compte des caractéristiques principales de l'orthographe du français pour établir une progression systématique :

- la consistance des correspondances entre les graphèmes et les phonèmes (dans le sens de la lecture, 85 % des correspondances graphème-phonème sont prévisibles) ;
- la fréquence des mots rencontrés même s'ils sont irréguliers (par exemple, présentation assez rapide des mots outils comme les articles, les pronoms, les prépositions) ;
- les règles de variation contextuelle (par exemple le « s » en début de mot, entre deux voyelles, en fin de mot) ;
- les lettres muettes de fin de mots : certaines de ces lettres sont des « morpho-phonogrammes » de deux types : les uns

Figure 1. Quatre niveaux différents de la version française de GraphoGame. a) l'enfant entend le phonème /a/ et doit choisir l'une des options proposées ; b) l'enfant entend la syllabe /fa/ et doit choisir l'une des options ; c) l'enfant entend le mot « bronche » et doit choisir parmi trois options : « branche », « bronche » et « broche » ; d) l'enfant entend le mot « mince » et doit remettre les lettres dans le bon ordre.



marquent les flexions nominales (le genre et le nombre, *e* et *s* dans « amies ») et verbales (le *s* dans « tu chantes » et *ent* dans « ils mangent »). D'autres lettres muettes sont des supports de dérivation (le *t* de « toit/toiture ») qui sont aussi, dans certains cas, des supports de flexion (le *d* dans « grand/grande/grandeur »).

L'élaboration de cette progression s'est faite à partir de la base de données Manulex-Morpho (Peereman, Sprenger-Charolles & Messaoud-Galusi, 2013), issue de Manulex (Lété, Sprenger-Charolles & Colé, 2004). Manulex est une base de données créée à partir de 54 manuels scolaires du primaire. Cette base fournit les fréquences d'occurrence des mots écrits à 3 niveaux d'expertise de la lecture : le CP où se construit le lexique de l'enfant sur la base de la médiation phonologique, le CE1 où se construit le lexique orthographique par automatisation progressive de la reconnaissance du mot écrit et le cycle 3 (CM1-CM2) où se consolide et s'enrichit le stock lexical par exposition répétée à l'écrit. Cette base contient 1 900 000 mots dont 49 000 formes différentes (avec les marques morphologiques de flexion et bien sûr, toutes les formes dérivées) et seulement 24 000 mots sans formes fléchies.

À partir de cette base de données, a été développé Manulex-Infra (Peereman *et al.*, 2007) pour décrire les caractéristiques infralexicales des mots puis Manulex-Morpho (Peereman *et al.*, 2013). Dans cette base, qui a été utilisée pour construire la progression de GG (voir l'article de Sprenger-Charolles dans ce numéro), les morphophonogrammes font partie des unités infralexicales prises en compte dans les analyses de la fréquence

et de la consistance des correspondances graphème-phonème et phonème-graphème. Par exemple, en utilisant Manulex-Morpho, nous pouvons connaître la fréquence du graphème *s* par rapport aux autres graphèmes du français. De la même manière, nous pouvons aussi connaître la régularité des correspondances graphème-phonème pour le graphème *s*, à savoir, combien de fois il se lit /s/ comme dans « sol », /z/ comme dans « rose » et, en fin de mots, combien de fois il se prononce (comme dans « ours ») ou est muet. Dans ce dernier cas, le plus fréquent, il est souvent une marque morphologique, comme le *s* qui est une flexion nominale (amis) ou verbale (tu chantes) ou une marque de flexion/dérivation (gris) ; il peut aussi n'avoir aucune valeur spécifique comme dans « alors ».

Description du fonctionnement de GG

L'enfant est équipé d'un casque dans lequel il entend un stimulus auditif. En fonction du type de jeu (voir ci-dessous), plusieurs propositions sont présentées visuellement et l'enfant doit identifier celles qui correspondent au stimulus auditif et cliquer dessus pour valider son choix. Si l'enfant donne la bonne réponse, un autre stimulus lui est proposé. Lorsque l'enfant se trompe, la correction est automatique et visible, et le stimulus auditif lui est à nouveau présenté tandis que la syllabe réapparaît, marquée d'une couleur. Le logiciel enregistre les réponses et adapte le passage des niveaux en fonction du taux de réussite. Si le taux de réussite est insuffisant (< 85 %), l'enfant doit recommencer le niveau. Chaque stimulus apparaît plusieurs fois au cours d'un niveau. GG enregistre également les temps de réponse.

Le contenu (*i.e.*, la progression) est organisé en une vingtaine d'unités pédagogiques ou séquences (par exemple, la première séquence propose les voyelles simples *a, o, ou*). Une séquence dure entre 15 et 20 minutes selon la vitesse de l'enfant et le taux d'erreur. La progression est faite de telle sorte que chaque séquence comprendra uniquement des mots comportant des relations graphophonologiques déjà vus précédemment. Chaque séquence est subdivisée en une dizaine de niveaux (ou *levels*) d'une 1 à 2 minutes (10 à 15 essais). Dans la présente version du logiciel, l'ordre des séquences est fixé d'avance. Le choix des problèmes ne dépend donc pas du niveau de performance des élèves. En revanche, le passage au prochain niveau se fait en fonction du taux de réussite. Donc un élève avec un faible niveau de lecture restera plus longtemps dans les niveaux élémentaires qu'un élève avec un bon niveau de lecture.

À chaque niveau, un exercice différent sous forme de jeu est proposé à l'enfant dans un environnement graphique renouvelé pour maintenir la motivation. Les différents jeux sont :

- les jeux classiques (plusieurs environnements possibles, cf. *figure 1a et 1b*) où il s'agit pour l'enfant d'identifier le graphème, la syllabe ou encore le mot qui correspond à une prononciation donnée ;
- les jeux à choix multiple où il s'agit pour l'enfant de rechercher tous les graphèmes, les syllabes ou encore les mots qui correspondent à une prononciation donnée ;
- les jeux de discrimination auditive et visuelle ;
- les jeux de formation de mots et de phrases où il s'agit pour l'enfant de remettre dans l'ordre une suite de graphèmes (pour un mot) ou une suite de mots (pour une phrase) en fonction de ce qu'il a entendu (cf. *figure 1c et 1d*).

Les premier et dernier niveau de chaque séquence servent de prétest et post-test « interne » permettant d'évaluer si l'enfant a progressé au sein du jeu. Ces niveaux sont identiques et proposent un contenu représentatif de la séquence. Ces niveaux ne sont pas répétés même si l'enfant est en dessous du seuil de réussite.

ÉTUDE DE VALIDATION

Population

Au CP, 34 enfants issus de deux écoles élémentaires du département des Alpes de Haute-Provence ont participé à l'étude. Les enfants ont été choisis à partir des signalements des enseignants (au retour de la Toussaint pour les CP démarrant l'expérimentation début janvier). Au CE1, 40 enfants issus de 6 écoles du département des Alpes de Haute-Provence ont été sélectionnés à la fin du CP pour un démarrage de l'expérimentation en septembre. Les données de 5 enfants du CE1 ont été éliminées pour différentes raisons (abandon, blocage au même niveau tout au long du jeu, problèmes techniques) ramenant le nombre total de participants à 35. Les élèves ont été assignés à un groupe de façon aléatoire. Le groupe 1 commençait avec GG tandis que le groupe 2 effectuait un entraînement Math (CE1) ou aucun entraînement sur tablette (CP). Les groupes ont été inversés après 5 semaines. Le *tableau 1* résume la répartition des élèves par groupe et l'appariement des groupes en termes de nombre d'enfants, âge, sexe ainsi que les résultats cognitifs et langagiers. L'étude a été validée par l'Inspecteur d'académie, directeur académique des services de l'Éducation nationale (IA-DASEN). Une lettre d'information a été transmise aux parents afin d'avoir leur autorisation écrite pour inclure leur enfant dans l'étude.

Les tests d'évaluation

Les tests du CP

Les matrices progressives de Raven (PM 47, Raven, 1976). Pour évaluer le niveau cognitif non verbal des enfants, les matrices progressives de Raven couleur (qui testent le raisonnement analogique) ont été choisies (PM 47). Ce test, qui est l'un des plus sensibles pour évaluer le facteur général d'intelligence (Prabhakaran, Smith, Desmond, Glover & Gabrieli, 1997), se compose de 3 séries de 12 items proposées aux enfants sans limite de temps. Les normes ont été établies sur une population française de 1 064 enfants âgés de 4 à 11 ans et demi. Aucun indice de fiabilité (alpha de Cronbach) n'est donné pour ce test en français.

Test de vocabulaire actif et passif (TVAP 5-8 ans Deltour & Hupkens, 1984)

Pour évaluer le niveau d'intelligence verbale (et écarter un trouble spécifique du langage oral avec retentissement

Tableau 1. Composition des groupes ayant participé à l'expérimentation et résultats au Test de vocabulaire actif et passif (TVAP), matrices progressives de Raven (PM 47) et tests de lecture (CP, lecture en 1 minute ; CE1, Alouette).

	CP			CE1		
	Groupe 1	Groupe 2	Total	Groupe 1	Groupe 2	Total
Nombre	19	15	34	18	17	35
Âge (mois)	77.3	74.9	76.0	87.9	89.1	88.5
Sexe (G/F)	10/9	8/7	18/16	11/7	7/10	18/17
TVAP	39.5	43.0	41.0	46.5	44.7	45.6
PM47	22.1	22.4	22.2	24.9	25.6	25.2
Lecture (M/min)	12.4	13.9	13.0	12.1	13.4	12.8

sur la lecture), nous avons choisi un test de vocabulaire (TVAP 5-8 ans). Nous avons évalué uniquement le niveau de vocabulaire en réception, c'est-à-dire la capacité à associer un mot prononcé par l'expérimentateur avec la bonne image parmi 6 représentées : l'image correcte, 1 proche et 4 distracteurs. Par exemple, pour « château », l'image d'un château (choix correct, 2 points), d'une grande maison (choix proche, 1 point), d'un gâteau, d'un chat, d'une tour de contrôle et d'un roi. Aucun indice de fiabilité (alpha de Cronbach) n'est donné pour ce test.

Test de lecture en 1 min (Gentaz, Sprenger-Charolles, Theurel & Colé, 2013)

Le test utilisé au CP pour évaluer le niveau de lecture au cours des 10 semaines d'entraînement avec GG est un test de lecture de mots familiers et de mots inventés pour le début du CP. Il consiste à lire à haute voix le plus de mots possibles en 1 minute pour chaque catégorie.

Les mots familiers (35, 5 par ligne) sont fréquents et figurent parmi les 1 000 premiers mots des manuels du premier grade (Lété *et al.*, 2004). Ils sont courts, mono- ou bi-syllabiques, réguliers sur le plan des correspondances graphème-phonème (mais 5 d'entre eux ont un graphème dont la prononciation dépend d'une règle contextuelle, *c* ou *g*) et ils comportent peu de groupes consonantiques

Les mots inventés ou pseudo-mots sont appariés aux mots fréquents en longueur, en structure syllabique et en difficulté orthographique (30 mots, 5 par ligne). Ils sont tous réguliers sur le plan des correspondances graphème-phonème, mais comme pour les mots, 5 d'entre eux ont un graphème dont la prononciation dépend d'une règle contextuelle (*c* ou *g*). Le coefficient de fidélité pour ce test (Cronbach *alpha*) est de .92.

Lorsque l'enfant a lu moins de 4 mots correctement sur les 10 premiers mots d'une catégorie, l'épreuve est arrêtée. Ce test a été passé à trois reprises lors des phases de prétest, à 5 semaines (mi-test) et à la fin des 10 semaines d'entraînement (post-test).

Le test de l'Alouette (Lefavrais, 1965)

Ce test a été utilisé pour évaluer le niveau de lecture au CE1. Il propose un texte asémantique de 265 mots avec une présence accrue de mots peu fréquents obligeant l'enfant à mettre en œuvre la procédure de décodage grapho-phonologique plutôt que ses connaissances lexicales. Ce test est très sensible aux difficultés de lecture (Bertrand, Fluss, Billard & Ziegler, 2010 ; Cavalli *et al.*, 2017).

Méthode d'expérimentation

Nous avons choisi de comparer deux groupes d'entraînement randomisés afin d'éviter un biais de sélection : un groupe d'entraînement à la lecture sur GG et un groupe contrôle (APC classique au CP, mathématiques au CE1). L'utilisation d'un groupe contrôle répond à deux objectifs. Il permet d'une part de neutraliser d'autres facteurs pouvant intervenir dans l'évolution du niveau de lecture des

élèves, comme par exemple les apprentissages scolaires ou un désir accru de bien faire, lié au fait de participer à cette étude. Chaque groupe d'enfants a été tour à tour groupe GG et groupe contrôle. Le design de cette étude permet ainsi à chaque enfant d'être son « propre contrôle ».

L'évolution du niveau de lecture des élèves a été mesurée grâce aux tests de lecture étalonnés décrits précédemment, mais aussi grâce aux données issues de GG. Nous pourrions ainsi comparer les résultats obtenus à partir de ces données internes et externes à GG.

Groupe GG versus Groupe contrôle

Pour les élèves de CE1, le groupe contrôle s'entraînait avec un logiciel de mathématiques *Toké Maths* (<http://www.tokemaths.com>). Pendant une première période de 5 semaines, le 1^{er} groupe utilisait GG et le 2^e *Toké Maths*. Pendant la seconde période de 5 semaines, les 2 groupes étaient inversés. Pour les élèves de CP, nous n'avons pas trouvé de logiciel de mathématiques adapté. Il a donc été décidé de laisser le groupe contrôle en soutien scolaire (APC) classique avec l'enseignant. Au cours des prétests, tous les tests étaient proposés aux enfants de CE1 ou CP. Au cours des mi-tests et post-tests, seuls les tests de lecture étaient présentés aux enfants. L'ordre de passation des tests ainsi que les modalités de passation ont été strictement les mêmes pour les expérimentateurs.

Les entraînements ont été réalisés dans le cadre des temps d'APC. La durée des entraînements était d'1 heure par semaine à raison de 3 fois 20 min ou 2 fois 30 min (5 heures en total).

RÉSULTATS

L'analyse des logs a montré que le temps effectif passé sur les exercices de GG était en moyenne de 2 heures 50 minutes au CP et de 2 heures 37 minutes au CE1.

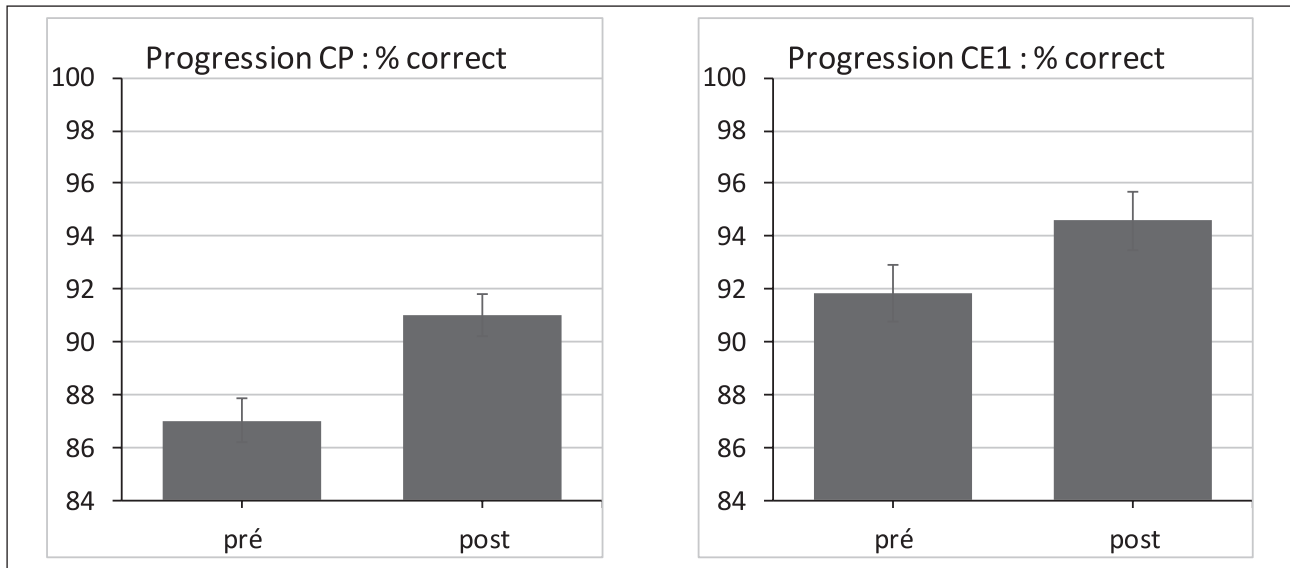
Progression au sein de GG

La progression des élèves au sein du jeu GG a été évaluée en comparant le pourcentage de bonnes réponses du premier niveau de chaque séquence (prétest) au pourcentage de bonnes réponses du dernier niveau (post-test) de chaque séquence. Ces niveaux étaient identiques permettant de mesurer la progression « immédiate » au sein du jeu. Comme le montre la *figure 2*, les enfants du CP ont progressé en moyenne de 4 % entre le prétest et le post-test de chaque séquence ($t(33) = 4.53 ; p < .0001$). Au CE1, ils ont progressé en moyenne de 2,75 % entre les prétests et les post-tests de chaque séquence ($t(35) = 3.8 ; p < .001$).

Progression dans les tests de lecture

La progression des élèves en fonction du type d'entraînement a été évaluée par une analyse de variance (ANOVA)

Figure 2. Progression (% correct) au sein du jeu GG entre le premier et le dernier niveau de chaque séquence pour les enfants du CP (à gauche) et du CE1 (à droite). Les barres d'erreurs correspondent à des erreurs standards intra-sujets.



avec deux facteurs intra-sujets, le facteur Progression (pré-test versus post-test) et le facteur Type d'intervention (GG versus APC classique pour le CP ; GG versus Math pour le CE1). Un effet spécifique de l'entraînement se manifeste par une interaction significative entre le facteur Progression et le facteur Type d'intervention.

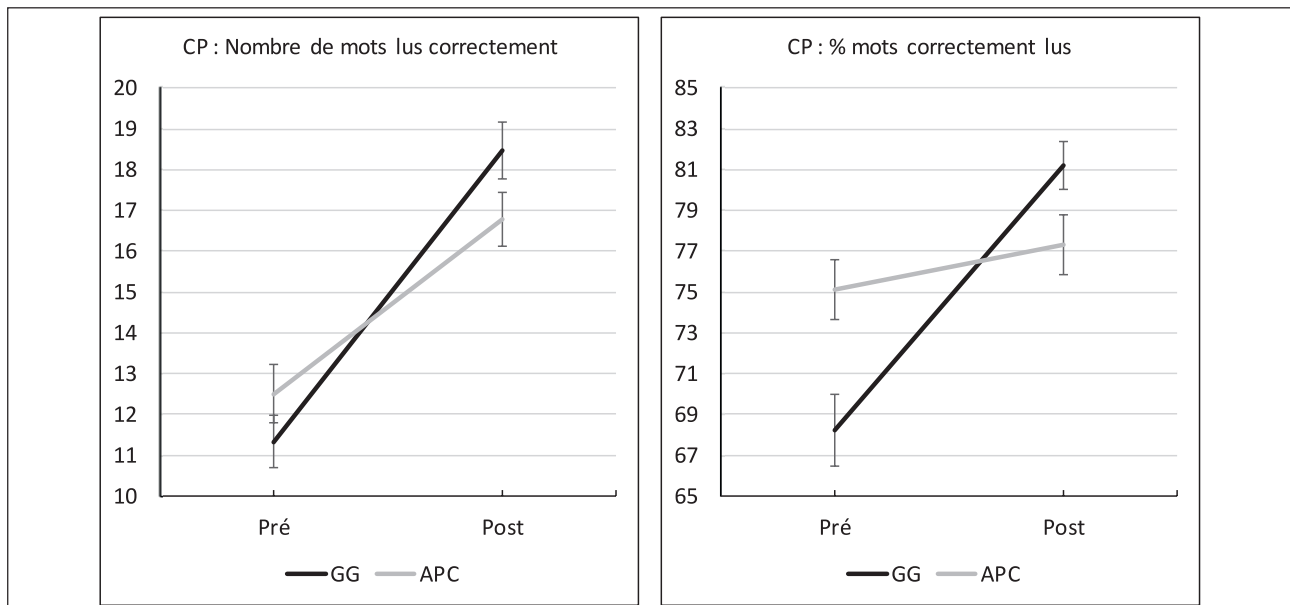
Résultats CP

Les résultats du test de lecture (lecture en 1 minute) réalisé avant et après l'entraînement sont présentés dans la figure 3 pour la fluence (nombre de mots correctement lus en 1 minute) et la précision (% de mots correctement lus). Pour la fluence, l'ANOVA montre un effet du facteur Progression ($F(1,33) = 94.4, p < .0001$) reflétant le fait que l'ensemble des enfants ont progressé entre le prétest et le post-test. Plus important, l'interaction entre le facteur Progression et le facteur Type d'intervention est signifi-

cative ($F(1,33) = 12.8, p < .001$) indiquant que les enfants ont davantage progressé après les séances GG qu'après un entraînement APC classique. Pour la précision, l'ANOVA montre également un effet significatif du facteur Progression ($F(1,33) = 32.4, p < .001$) et une interaction significative entre le facteur Progression et le facteur Type d'intervention ($F(1,33) = 8.2, p < .01$). Cette interaction reflète le fait que la précision de lecture était meilleure après les séances de GG (+ 13.01 %) qu'après l'APC classique (+ 2.23 %).

En ce qui concerne la lecture de pseudomots au CP, l'ANOVA montre un effet significatif du facteur Progression pour la vitesse ($F(1,33) = 75.8, p < .0001$) et la précision ($F(1,33) = 24.2, p < .0001$) mais l'interaction entre le facteur Progression et le facteur Type d'Intervention n'est pas significative ni pour la fluence ni pour la précision ($F < 1$).

Figure 3. Nombre de mots familiers correctement lus en 1 minute (gauche) et pourcentage de mots correctement lus (droite) au prétest et post-test du test de lecture en 1 minute au CP. Les barres d'erreurs correspondent à des erreurs standards intra-sujets.



Résultats CE1

Les résultats du test de l'Alouette passés avant et après l'entraînement sont présentés dans la *figure 4* pour la fluence (nombre de mots correctement lus en 3 minutes) et la précision (% de mots correctement lus). L'analyse de la fluence montre que l'ensemble des enfants ont progressé entre le prétest et le post-test avec un effet significatif du facteur Progression ($F(1,34) = 116.2, p < .0001$). L'interaction entre le facteur Progression et le facteur Type d'intervention est également significative ($F(1,34) = 7.6, p < .01$) indiquant que les élèves ont davantage progressé après l'entraînement GG qu'après l'entraînement mathématique. Pour la précision, l'ANOVA montre un effet significatif du facteur Progression ($F(1,34) = 13.4, p < .001$) mais l'interaction entre le facteur Progression et le facteur Type d'intervention n'était pas significative ($F < 1$).

Profil des enfants « répondants » et « résistants » à l'intervention

Pour analyser les profils des enfants « répondants » et « résistants » à l'intervention (Fuchs & Fuchs, 2006) au CP, nous avons créé deux groupes en fonction du taux de progression moyen (13 %) : un avec 17 enfants « répondants » qui ont obtenu des scores de progression au-dessus de cette moyenne ; l'autre avec 17 enfants « résistants » qui

ont obtenu des scores de progression en dessous de cette moyenne. Pour identifier des variables qui expliqueraient pourquoi certains enfants répondent mieux à l'intervention que d'autres, nous avons comparé les 2 groupes sur les variables suivantes : âge, niveau de vocabulaire (TVAP), intelligence non-verbale (PM47), niveau de lecture initial, progression au sein de GG, temps effectif joué et nombre de niveaux joués. Comme le montre le *tableau 2*, les « répondants » (++) avaient un niveau de lecture initial significativement plus faible que les « résistants » ($p < .0001$). De façon tendancielle mais non significative ($p < .10$), les enfants « répondants » avaient un niveau de vocabulaire légèrement supérieur et une meilleure progression de jeu.

Une analyse similaire a été effectuée pour les enfants du CE1. Nous avons regroupé les enfants en fonction de leur score de vitesse obtenu à l'Alouette avec un premier groupe de 10 enfants « répondants » ayant progressé de plus de 20 points (++) et un second groupe de 10 enfants « résistants » ayant progressé de moins de 10 points (--). Le profil de ces enfants a été étudié en fonction des variables Âge, TVAP, PM47, niveau de lecture initial, temps effectif joué, nombre de niveaux joués et progression au sein de GG (cf. *tableau 3*). Il en résulte que les enfants répondants ont un meilleur niveau de vocabulaire mais aucune différence en termes d'âge, PM47, ou progression au sein de GG.

Figure 4. Nombre de mots correctement lus en 3 minutes (gauche) et pourcentage de mots correctement lus (droite) au prétest et post-test du test de l'Alouette CE1. Les barres d'erreurs correspondent à des erreurs standards intra-sujets.

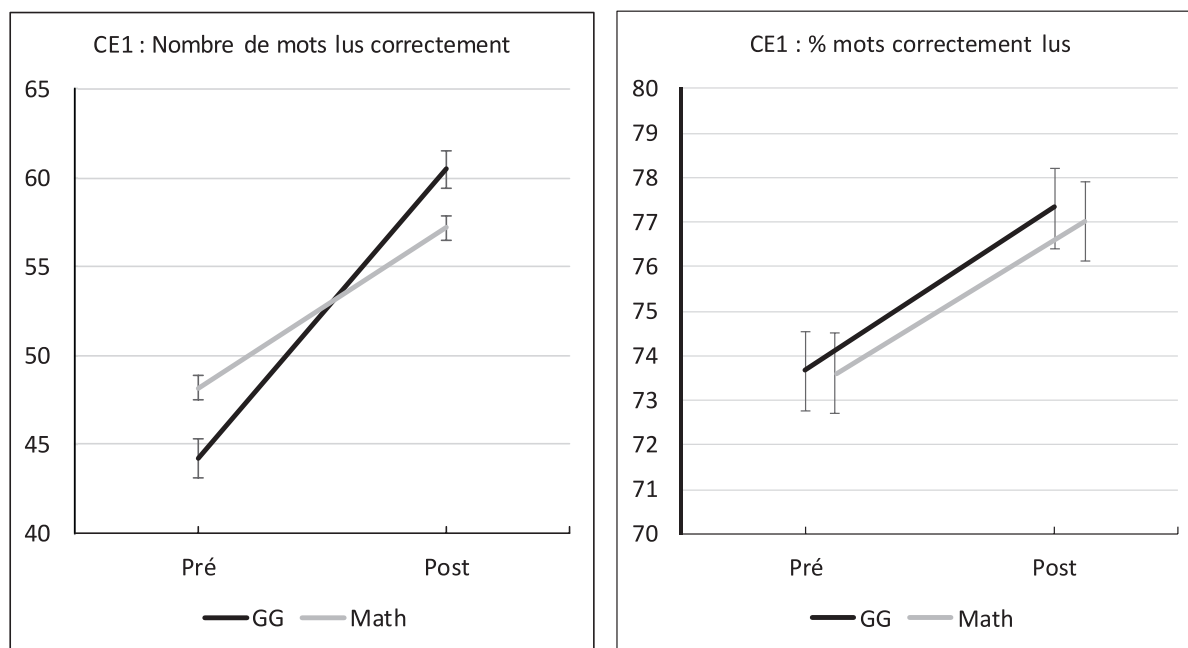


Tableau 2. Comparaison des enfants du CP ayant progressé plus que la moyenne (++, « répondants ») avec les enfants ayant progressé moins que la moyenne (--, « résistants »).

Groupe	Âge	TVAP	PM47	Niveau de lecture initial	Progression au sein de GG (%)	Temps de jeu effectif	Nombre de niveaux joués
--	76,29	39,88	22,82	79,52	3,62	2 h 57	191,29
++	71,94	42,24	21,65	56,89	4,14	2 h 43	175,76
Test t				***			

*** = $p < .0001$

Tableau 3. Profil des enfants du CE1 ayant progressé plus de 20 points après les séances GG (++, « répondants ») versus ceux qui ont progressé moins de 10 points (--, « résistants »).

Groupe	Âge	TVAP	PM47	Niveau de lecture initial	Progression au sein de GG (%)	Temps de jeu effectif	Nombre de niveaux joués
--	91,4	44,3	25,3	35,5	2 h 32	161	2,6
++	88,4	48,6	24,9	40,2	2 h 47	159	2,8
Test t		*					

* = $p < .05$

DISCUSSION

L'objectif de cette étude consistait à tester et valider par un protocole contrôlé et randomisé l'efficacité de l'adaptation française de GG auprès d'enfants « à risques » de dyslexie scolarisés au CP et au CE1 et participant à une prise en charge complémentaire au sein de l'école. Les résultats obtenus permettent d'affirmer que GG a apporté un bénéfice spécifique pour ces élèves. En effet, pour les enfants du CP, les résultats du test de lecture en 1 minute, proposé avant et après chaque phase d'entraînement, montrent que la vitesse et la précision de lecture de mots familiers ont progressé plus après la phase GG qu'après la phase APC classique. Ces bénéfices ont été obtenus après seulement 5 semaines d'entraînement (durée de 2 h 50). En revanche, aucun effet spécifique de l'entraînement n'a été obtenu pour la lecture de mots inventés (pseudo-mots). Un entraînement avec GG génère donc un effet de transfert à la lecture à voix haute de mots familiers mais pas de pseudo-mots. Il est possible que le transfert à la lecture de pseudo-mots nécessite un entraînement plus intense.

Les résultats du CE1 montrent également des effets d'entraînement spécifique à GG pour la vitesse de la lecture dans le test de l'Alouette mais pas sur la précision de la lecture : les enfants ont lu significativement plus de mots après les phases d'entraînement GG qu'après les phases d'entraînement *TokéMath*. Ces effets ont été obtenus après seulement 5 semaines d'entraînement, soit 2 h 37. Il convient de noter que les 2 tests de lecture impliquent la lecture à voix haute tandis que GG n'entraîne pas explicitement la lecture à voix haute. Il est donc possible que les effets de transfert de l'entraînement aient été plus importants dans un test de lecture silencieuse basé sur reconnaissance visuelle des mots, tel que *Timé2* (Ecalte, 2003), ou dans un test de choix orthographique (Siegel, Share & Geva, 1995).

L'analyse des profils des enfants « répondants » versus « résistants » à l'intervention montre l'importance de deux variables. Tout d'abord, au CP, les enfants ayant un niveau de lecture initial plus faible ont plus bénéficié de l'entraînement avec GG que les enfants ayant un niveau de lecture initial plus élevé. Cela suggère que les outils informatiques tels que GG sont particulièrement bénéfiques pour les enfants en grande difficulté de lecture. Deuxièmement, dans le groupe CE1, les enfants « répondants » avaient un niveau de vocabulaire plus élevé que les enfants « résistants ». Ce résultat suggère que les compétences langagières, indexées ici par le niveau de vocabulaire,

puissent agir comme un facteur de protection comme cela a été montré dans des études récentes chez les dyslexiques adultes (Cavalli, Casalis *et al.*, 2016). Par exemple, les élèves qui ont un vocabulaire plus étendu ont plus de chance de reconnaître (ou de reconnaître plus rapidement) les mots qu'ils décodent parce qu'ils en ont une représentation dans leur lexique phonologique. Ils pourraient mieux profiter de GG parce que les conditions préalables à la formation d'une représentation orthographique sont réunies.

Cette étude présente certaines limitations qu'il convient de souligner. Premièrement, le taux d'entraînement semble trop faible par rapport aux études qui ont rapporté des effets d'entraînement très impressionnants tant au niveau comportemental que cérébral. Par exemple, dans l'étude de Eden *et al.* (2004), les adultes dyslexiques ont bénéficié d'un entraînement de 112 heures (3 heures par jour pendant 8 semaines). Dans l'étude de Simos *et al.* (2002), les enfants dyslexiques ont eu un entraînement de 80 heures (1-2 heures par jour pendant 8 semaines). Enfin, dans l'étude de Franceschini *et al.* (2013), les enfants dyslexiques ont été entraînés pendant 12 heures. Nous nous attendons à des effets d'entraînement plus robustes avec un entraînement plus important. Deuxièmement, nous n'avons pas pu suivre ces enfants pour savoir si les effets d'entraînement persistent dans la durée et lesquels de ces enfants « à risque » ont été diagnostiqués dyslexiques par la suite. En effet, la persistance des effets d'entraînements dans la durée est un enjeu majeur et peu d'études d'entraînement ont étudié les effets d'entraînement à long terme (Elbro & Petersen, 2004). Troisièmement, comme discuté plus haut, nous avons uniquement utilisé des tests de lecture à voix haute. Or, nous pouvons nous attendre à des effets plus importants sur la lecture silencieuse (Ziegler, Bertrand *et al.*, 2014). Enfin, nous n'avons pas pu vérifier si l'entraînement a un effet bénéfique sur la compréhension de textes lors de la lecture (Gough & Tunmer, 1986).

En conclusion, cette première validation de GG pour les enfants à risque en contexte scolaire est assez encourageante. L'outil, adopté par les enseignants comme par les élèves, a permis d'obtenir des effets positifs sur la vitesse et la précision de la lecture des mots familiers au CP et la vitesse de la lecture au CE1. Ces résultats ont été obtenus après seulement 5 semaines d'entraînement en raison d'1 heure par semaine. Il est probable qu'on puisse obtenir de meilleures progressions avec une période d'utilisation plus longue. Plus que jamais, dans une volonté de promouvoir une approche éducative fondée sur la preuve (Davies, 1999), des études randomisées et contrôlées sont

nécessaires pour évaluer et quantifier l'apport de ces nouveaux outils numériques dans un contexte scolaire (Ecalte, Kleinsz & Magnan, 2013 ; Girard *et al.*, 2013).

REMERCIEMENTS

Nous remercions Nathalie Fina et Christine Garcia d'avoir réalisé cette étude dans le contexte de leur mémoire d'orthophonie et Sylvie Rouillard, Édouard Alavoine et Jean-Patrice Albrand pour leur aide technique tout au long de ce projet. Nos remerciements vont également aux équipes pédagogiques et aux enfants des écoles de la circonscription de Sisteron Sud dans les Alpes de Haute Provence. Cette recherche a été financée par un contrat ANR [ANR- 13-APPR-0003]. Cette recherche a également bénéficié du support du Labex BLRI (ANR-11-LABX-0036) et de l'Institut Convergence ILCB (ANR-16-CONV-0002) et de l'initiative d'excellence d'Aix-Marseille Université (A*MIDEX).

RÉFÉRENCES

AARON, P.G., JOSHI, R.M., GOODEN, R. & BENTUM, K.E. (2008). Diagnosis and treatment of reading disabilities based on the component model of reading: an alternative to the discrepancy model of LD. *Journal of Learning Disabilities*, 41 (1), 67-84.

ANS, B., CARBONNEL, S. & VALDOIS, S. (1998). A connectionist multiple-trace memory model for polysyllabic word reading. *Psychological Review*, 105 (4), 678-723.

BEDDINGTON, J., COOPER, C. L., FIELD, J., GOSWAMI, U., HUPPERT, F.A., JENKINS, R. & THOMAS, S. M. (2008). The mental wealth of nations. *Nature*, 455 (7216), 1057-1060.

BERTRAND, D., FLUSS, J., BILLARD, C. & ZIEGLER, J.C. (2010). Efficacité, sensibilité, spécificité : comparaison de différents tests de lecture [Efficiency, sensitivity, specificity: Comparison of different reading tests]. *Année psychologique*, 110, 299-320.

BEYERSMANN, E., GRAINGER, J., CASALIS, S. & ZIEGLER, J.C. (2015). Effects of reading proficiency on embedded stem priming in primary school children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 139, 115-126.

BILLARD, C., FLUSS, J., DUCOT, B., BRICOUT, L., RICHARD, G., ECALLE, J., ..., ZIEGLER, J. (2009). Deficits in reading acquisition in primary school: cognitive, social and behavioral factors studied in a sample of 1062 children. *Revue Epidemiologique et Santé Publique*, 57 (3), 191-203.

BILLARD, C., FLUSS, J., RICHARD, G., ZIEGLER, J.C., ECALLE, J., MAGNAN, A. & SPIRA, A. (2007). *Résultats préliminaires d'une étude épidémiologique transversale des apprentissages en lecture, orthographe et calcul au CE1*. Retrieved from Paris:

BOSSE, M.L., TAINURIER, M.J. & VALDOIS, S. (2007). Developmental dyslexia: the visual attention span deficit hypothesis. *Cognition*, 104 (2), 198-230.

CAVALLI, E., CASALIS, S., ELAHMADI, A., ZIRA, M., PORACCHIA-GEORGE, F. & COLÉ, P. (2016). Vocabulary skills are well developed in university students with dyslexia: Evidence from multiple case studies. *Research Developmental Disabilities*, 51-52, 89-102.

CAVALLI, E., COLÉ, P., BADIÉ, J.M., ZIELINSKI, C., CHANOINE, V. & ZIEGLER, J.C. (2016). Spatiotemporal Dynamics of Morphological Processing in Visual Word Recognition. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 28 (8), 1228-1242.

CAVALLI, E., COLÉ, P., LELOUP, G., PORACCHIA-GEORGE, F., SPRENGER-CHAROLLES, L. & EL AHMADI, A. (2017). Screening for Dyslexia in French-Speaking University Students: An Evaluation of the Detection Accuracy of the Alouette Test. *Journal of Learning Disabilities*, 22219417704637.

CEDRE. (2015). *Nouvelle évaluation en fin de collège : compétences langagières et littéraires. Évaluation des acquis des élèves*. Direction de l'évaluation, de la prospective et de la performance (DEPP).

COLLIS, N.L., KOHNEN, S. & KINOSHITA, S. (2013). The role of visual spatial attention in adult developmental dyslexia. *Quarterly Journal of Experimental Psychology (Hove)*, 66 (2), 245-260.

CUNNINGHAM, A.E., PERRY, K.E., STANOVICH, K.E. & SHARE, D.L. (2002). Orthographic learning during reading: Examining the role of self-teaching. *Journal of Experimental Child Psychology*, 82 (3), 185-199.

CUNNINGHAM, A.E. & STANOVICH, K.E. (1997). Early reading acquisition and its relation to reading experience and ability 10 years later. *Developmental Psychology*, 33 (6), 934-945.

DAVIES, P. (1999). What is Evidence-based Education? *British Journal of Educational Studies*, 47 (2), 108-121.

DELTOUR, J.J. & HUPKENS, D. (1984). *Test de vocabulaire actif et passif pour enfants (5 à 8 ans) (TVAP)*. Braine-le-Château : éditions de l'Application des techniques modernes.

ECALLE, J. (2003). *Timé-2 : test d'identification de mots écrits pour enfants de 6 à 8 ans*. Paris : Centre de psychologie appliquée.

ECALLE, J., KLEINSZ, N. & MAGNAN, A. (2013). Computer-assisted learning in young poor readers: The effect of grapho-syllabic training on the development of word reading and reading comprehension. *Computers in Human Behavior*, 29 (4), 1368-1376.

ECALLE, J., MAGNAN, A., BOUCHAFA, H. & GOMBERT, J.E. (2009). Computer-based training with ortho-phonological units in dyslexic children: new investigations. *Dyslexia*, 15 (3), 218-238.

EDEN, G.F., JONES, K.M., CAPPELL, K., GAREAU, L., WOOD, F.B., ZEFFIRO, T.A. & FLOWERS, D. L. (2004). Neural Changes following Remediation in Adult Developmental Dyslexia. *Neuron*, 44 (3), 411-422.

ELBRO, C. & PETERSEN, D. K. (2004). Long-Term Effects of Phoneme Awareness and Letter Sound Training: An Intervention Study With Children at Risk for Dyslexia. *Journal of Educational Psychology*, 96 (4), 660-670.

FLUSS, J., ZIEGLER, J.C., ECALLE, J., MAGNAN, A., WARSZAWSKI, J., DUCOT, B. & BILLARD, C. (2008). Prevalence of reading disabilities in early elementary school: Impact of socioeconomic environment on reading development in 3 different educational zones. *Archives de pédiatrie*, 15 (6), 1049-1057.

FRANCESCHINI, S., GORI, S., RUFFINO, M., VIOLA, S., MOLteni, M. & FACOETTI, A. (2013). Action Video Games Make Dyslexic Children Read Better. *Current Biology*, 23 (6), 462-466.

FUCHS, D. & FUCHS, L.S. (2006). Introduction to response to intervention: What, why, and how valid is it? *Reading Research Quarterly*, 41 (1), 93-99.

GABRIELI, J.D. (2009). Dyslexia: a new synergy between education and cognitive neuroscience. *Science*, 325 (5938), 280-283.

GENTAZ, É., SPRENGER-CHAROLLES, L., THEUREL, A. & COLÉ, P. (2013). Reading comprehension in a large cohort of French first graders from low socio-economic status families: a 7-month longitudinal study. *PLoS ONE*, 8 (11), e78608.

GIRARD, C., ECALLE, J. & MAGNAN, A. (2013). Serious games as new educational tools: how effective are they? A meta-analysis of recent studies. *Journal of Computer Assisted Learning*, 29 (3), 207-219.

GOUGH, P.B. & TUNMER, W.E. (1986). Decoding, Reading, and Reading Disability. *Remedial and Special Education*, 7 (1), 6-10.

GRAINGER, J., DUFAU, S. & ZIEGLER, J.C. (2016). A Vision of Reading. *Trends in Cognitive Sciences*, 20 (3), 171-179.

HABIB, M. (2014). *La Constellation des dys : bases neurologiques de l'apprentissage et de ses troubles*. Paris-Bruxelles : DeBoeck.

HABIB, M. & ZIEGLER, J.C. (2016). Dyslexie et troubles apparentés : une revue critique de 15 ans de recherche scientifique « Perspectives thérapeutiques ». In S. Pinto & L. Sato (Eds.), *Traité de neurolinguistique* (pp. 329-336). Louvain-la-Neuve : De Boeck Supérieur.

INSERM (2007). *Dyslexie, dysorthographe et dyscalculie. Bilan des données scientifiques*. Éditions INSERM.

KYLE, F., KUJALA, J., RICHARDSON, U., LYYTINEN, H. & GOSWAMI, U. (2013). Assessing the Effectiveness of Two Theoretically Motivated Computer-Assisted Reading Interventions in the United Kingdom: GG Rime and GG Phoneme. *Reading Research Quarterly*, 49, 59-74.

LANDERL, K., WIMMER, H. & FRITH, U. (1997). The impact of orthographic consistency on dyslexia: A German-English comparison. *Cognition*, 63 (3), 315-334.

- LEFAVRAIS, J. (1965). *Test de l'Alouette (révision 2005)*. Paris : ECPA.
- LETE, B., SPRENGER-CHAROLLES, L. & COLÉ, P. (2004). MANULEX: a grade-level lexical database from French elementary school readers. *Behavior Research Methods Instruments & Computers*, 36 (1), 156-166.
- MAGNAN, A., ECALLE, J., VEUILLET, E. & COLLET, L. (2004). The effects of an audio-visual training program in dyslexic children. *Dyslexia*, 10 (2), 131-140.
- MENGHINI, D., FINZI, A., BENASSI, M., BOLZANI, R., FACOETI, A., GIOVAGNOLI, S. & VICARI, S. (2010). Different underlying neurocognitive deficits in developmental dyslexia: a comparative study. *Neuropsychologia*, 48 (4), 863-872.
- NATIONAL INSTITUTE OF CHILD HEALTH AND HUMAN DEVELOPMENT (2000). *Report of the National Reading Panel. Teaching children to read: An evidence-based assessment of the scientific research literature on reading and its implications for reading instruction (NIH Publication No. 00-4769)*. Washington DC: US Government Printing Office.
- NEW, B., FERRAND, L., PALLIER, C. & BRYLSBAERT, M. (2006). Reexamining the word length effect in visual word recognition: new evidence from the English Lexicon Project. *Psychonomic Bulletin & Review*, 13 (1), 45-52.
- NORTON, E.S., BEACH, S.D. & GABRIELI, J.D. (2015). Neurobiology of dyslexia. *Current Opinions in Neurobiology*, 30, 73-78.
- OECD (2014). *PISA 2012 Results: What Students Know and Can Do – Student Performance in Mathematics, Reading and Science (Vol. I, Revised edition, February 2014)*. PISA: OECD Publishing.
- OJANEN, E., RONIMUS, M., AHONEN, T., CHANSA-KABALI, T., FEBRUARY, P., JERE-FOLOTIYA, J. & LYYTINEN, H. (2015). GraphoGame - a catalyst for multi-level promotion of literacy in diverse contexts. *Frontiers in Psychology*, 6, 671.
- PEEREMAN, R., LETE, B. & SPRENGER-CHAROLLES, L. (2007). Manulex-infra: distributional characteristics of grapheme-phoneme mappings, and infralexic and lexical units in child-directed written material. *Behavioral Research Methods*, 39 (3), 579-589.
- PEEREMAN, R., SPRENGER-CHAROLLES, L. & MESSAOUD-GALUSI, S. (2013). The contribution of morphology to the consistency of spelling-to-sound relations: A quantitative analysis based on French elementary school readers. *Année psychologique*, 113, 3-33.
- PENNINGTON, B.F. (2006). From single to multiple deficit models of developmental disorders. *Cognition*, 101 (2), 385-413.
- PERRY, C., ZIEGLER, J.C. & ZORZI, M. (2007). Nested incremental modeling in the development of computational theories: the CDP+ model of reading aloud. *Psychological Review*, 114 (2), 273-315.
- POTOCKI, A., MAGNAN, A. & ECALLE, J. (2015). Computerized trainings in four groups of struggling readers: Specific effects on word reading and comprehension. *Research in Developmental Disabilities*, 45-46, 83-92.
- PRABHAKARAN, V., SMITH, J.A., DESMOND, J.E., GLOVER, G.H. & GABRIELI, J.D. (1997). Neural substrates of fluid reasoning: an fMRI study of neocortical activation during performance of the Raven's Progressive Matrices Test. *Cognitive Psychology*, 33 (1), 43-63.
- RAMUS, F. (2001). Dyslexia - Talk of two theories. *Nature*, 412 (6845), 393-395.
- RAVEN, J.C. (1976). *Standard progressive matrices: Sets A, B, C, D & E*. Oxford: Psychologists Press.
- RICHARDSON, U. & LYYTINEN, H. (2014). The Graphogame method: the theoretical and methodological background of the technology-enhanced learning environment for learning to read. *Human Technology*, 10, 39-60.
- SAINE, N.L., LERKKANEN, M.K., AHONEN, T., TOLVANEN, A. & LYYTINEN, H. (2010). Computer-assisted remedial reading intervention for school beginners at risk for reading disability. *Child Development*, 82 (3), 1013-1028.
- SAKSIDA, A., IANNUZZI, S., BOGLIOTTI, C., CHAIX, Y., DEMONET, J. F., BRICOUT, L. & RAMUS, F. (2016). Phonological skills, visual attention span, and visual stress in developmental dyslexia. *Developmental Psychology*, 52 (10), 1503-1516.
- SHARE, D.L. (1995). Phonological recoding and self-teaching: Sine qua non of reading acquisition. *Cognition*, 55(2), 151-218.
- SIEGEL, L.S., SHARE, D. & GEVA, E. (1995). Evidence for superior orthographic skills in dyslexics. *Psychological Science*, 6 (4), 250-254.
- SIMOS, P.G., FLETCHER, J.M., BERGMAN, E., BREIER, J.I., FOORMAN, B.R., CASTILLO, E.M. & PAPANICOLAOU, A.C. (2002). Dyslexia-specific brain activation profile becomes normal following successful remedial training. *Neurology*, 58 (8), 1203-1213.
- SPRENGER-CHAROLLES, L. & COLÉ, P. (2003). *Lecture et dyslexie : approche cognitive*. Paris : Dunod.
- SPRENGER-CHAROLLES, L. & COLÉ, P. (2013). *Lecture et dyslexie : approche cognitive (2^e édition)*. Paris : Dunod.
- SPRENGER-CHAROLLES, L., SIEGEL, L. S., BECHENNEC, D. & SERNICLAES, W. (2003). Development of phonological and orthographic processing in reading aloud, in silent reading, and in spelling: A four-year longitudinal study. *Journal of Experimental Child Psychology*, 84 (3), 194-217.
- SPRENGER-CHAROLLES, L., SIEGEL, L.S., JIMENEZ, J.E. & ZIEGLER, J.C. (2011). Prevalence and Reliability of Phonological, Surface, and Mixed Profiles in Dyslexia: A Review of Studies Conducted in Languages Varying in Orthographic Depth. *Scientific Studies of Reading*, 15 (6), 498-521.
- STEIN, J. (2014). Dyslexia: the Role of Vision and Visual Attention. *Current Developmental Disorders Reports*, 1 (4), 267-280.
- VAN BERGEN, E., VAN DER LEIJ, A. & DE JONG, P.F. (2014). The intergenerational multiple deficit model and the case of dyslexia. *Frontiers in human neuroscience*, 8 (346).
- VIDYASAGAR, T.R. & PAMMER, K. (2010). Dyslexia: a deficit in visuo-spatial attention, not in phonological processing. *Trends in Cognitive Sciences*, 14 (2), 57-63.
- ZIEGLER, J.C., BERTRAND, D., LÉTÉ, B. & GRAINGER, J. (2014). Orthographic and phonological contributions to reading development: Tracking developmental trajectories using masked priming. *Developmental Psychology*, 50 (4), 1026-1036.
- ZIEGLER, J.C., CASTEL, C., PECH-GEORGEL, C., GEORGE, F., ALARIO, F.X. & PERRY, C. (2008). Developmental dyslexia and the dual route model of reading: Simulating individual differences and subtypes. *Cognition*, 107, 151-178.
- ZIEGLER, J.C. & GOSWAMI, U. (2006). Becoming literate in different languages: similar problems, different solutions. *Developmental Science*, 9 (5), 429-436.
- ZIEGLER, J.C., JACOBS, A.M. & STONE, G.O. (1996). Statistical analysis of the bidirectional inconsistency of spelling and sound in French. *Behavior Research Methods, Instruments & Computers*, 28 (4), 504-515.
- ZIEGLER, J.C., PECH-GEORGEL, C., DUFAU, S. & GRAINGER, J. (2010). Rapid processing of letters, digits, and symbols: What purely visual-attentional deficit in developmental dyslexia? *Developmental Science*, 13, F8-F14.
- ZIEGLER, J.C., PERRY, C. & ZORZI, M. (2014). Modelling reading development through phonological decoding and self-teaching: Implications for dyslexia. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 369, 20120397.
- ZOCCOLOTTI, P., DE LUCA, M., DI PACE, E., GASPERINI, F., JUDICA, A. & SPINELLI, D. (2005). Word length effect in early reading and in developmental dyslexia. *Brain and Language*, 93 (3), 369-373.
- ZORZI, M., BARBIERO, C., FACOETI, A., LONCIARI, I., CARROZZI, M., MONTICO, M. & ZIEGLER, J.C. (2012). Extra-large letter spacing improves reading in dyslexia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109 (28), 11455-11459.