



HAL
open science

Comprendre l'apprentissage orthographique et ses difficultés : apports et critiques des dernières modélisations computationnelles

Emilie Ginestet, Sylviane Valdois, Julien Diard, Marie-Line Bosse

► To cite this version:

Emilie Ginestet, Sylviane Valdois, Julien Diard, Marie-Line Bosse. Comprendre l'apprentissage orthographique et ses difficultés : apports et critiques des dernières modélisations computationnelles. A.N.A.E. Approche neuropsychologique des apprentissages chez l'enfant, 2020. <hal-03093817>

HAL Id: hal-03093817

<https://hal.science/hal-03093817v1>

Submitted on 4 Jan 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Comprendre l'apprentissage orthographique et ses difficultés : apports et critiques des dernières modélisations computationnelles

Émilie Ginestet, Sylviane Valdois, Julien Diard et Marie-Line Bosse

A.N.A.E. - Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant
2020 ; 32(164)

Résumé : Comprendre l'apprentissage orthographique et ses difficultés : apports et critiques des dernières modélisations computationnelles

Après un rappel des principes de l'hypothèse d'auto-apprentissage de l'orthographe lexicale, deux modélisations computationnelles récentes de cette hypothèse, qui simulent les performances de normo-lecteurs et de dyslexiques, sont détaillées. L'architecture et les résultats de ces modélisations nous permettent de confirmer ou de préciser certains mécanismes de l'apprentissage orthographique et de la dyslexie. Une analyse critique de ces modélisations met aussi en lumière leurs limites.

Mots clés : acquisition de l'orthographe, auto-apprentissage, modélisation, lecture, dyslexie

Abstract: Understanding orthographic learning and its difficulties: contributions and limits of the latest computational modeling

After a reminder of the principles of the self-teaching hypothesis of lexical orthography, two recent computational models of this hypothesis, which simulate the performance of normal readers and dyslexics, are detailed. The architecture and results of these models allow us to confirm or specify some mechanisms of orthographic learning and dyslexia. A critical analysis of these models also highlights their limits.

Key words: orthographic acquisition, self-teaching, implementation, reading, dyslexia

Resumen: Comprender el aprendizaje de la ortografía y sus dificultades: contribuciones y críticas a los últimos modelos computacionales propuestos en la literatura

En este artículo empezaremos por recordar los principios claves de la hipótesis del autoaprendizaje de la ortografía léxica. Después, presentaremos dos modelos computacionales, propuestos recientemente en la literatura, que han implementado esta hipótesis y que simulan el rendimiento de normolectores y disléxicos. La arquitectura y los resultados de estos modelos han permitido la especificación de ciertos mecanismos de

aprendizaje de la ortografía y de la dislexia. Un análisis crítico de estos modelos permite también de evidenciar sus limitaciones.

Palabras clave: adquisición ortográfica, autoaprendizaje, implementación computacional, lectura, dislexia

Nombre de caractères (espaces compris) : 36 754

Nombre de figures : 1

Introduction

L'automatisation du processus d'identification de mots joue un rôle majeur dans le passage d'une lecture sérielle lente chez le lecteur débutant, à une lecture fluente chez le lecteur expert. Cette transition est rendue possible grâce à l'acquisition des connaissances lexicales orthographiques, qui permettent d'identifier les mots d'un coup d'œil sans avoir besoin de les décoder. Ainsi, les mots sont lus sans effort et l'attention du lecteur peut être dévolue aux processus de plus haut niveau comme la compréhension. L'acquisition des connaissances orthographiques lexicales est donc essentielle dans le développement de la lecture experte (Castles, Rastle & Nation, 2018). Cependant, c'est une acquisition lente et parfois difficile, dont il est important de bien comprendre les mécanismes pour développer des propositions de situations d'apprentissage et de remédiation orthographiques les plus efficaces possibles. Dans cet article, nous proposons de partir de l'analyse des dernières modélisations computationnelles de l'acquisition de connaissances orthographiques lexicales, pour mieux comprendre les mécanismes de cette acquisition et aboutir à de nouvelles pistes de réflexion pour la pratique pédagogique et de remédiation de l'orthographe.

A l'école, de nombreux exercices sont proposés pour mémoriser explicitement l'orthographe de certains mots, comme des exercices d'épellation, de copie, de classement de mots (*e.g.*, Brissaud & Cogis, 2011). Cependant, cet enseignement explicite ne peut porter que sur un nombre assez limité de mots et il est très probable que l'on mémorise surtout l'orthographe lexicale des mots de façon totalement incidente, par simples expositions répétées à leur forme écrite, le plus souvent en contexte de lecture. Cet apprentissage se fait sans que le lecteur en ait conscience et sans passer par une stratégie particulière. Cet apprentissage de l'orthographe lexicale comme résultat de la simple lecture a été décrit et détaillé par David Share sous le terme d'hypothèse d'auto-apprentissage (1995, 1999, 2004). Ici, nous nous intéresserons uniquement aux mécanismes de cette mémorisation incidente de l'orthographe lexicale, qui vient d'être simulée pour la première fois par deux modèles computationnels récents (Pritchard, Coltheart, Marinus & Castles, 2018 ; Ziegler, Perry & Zorzi, 2014). Après avoir rappelé les principes théoriques de l'hypothèse d'auto-apprentissage et l'intérêt général des modélisations computationnelles pour comprendre les mécanismes cognitifs, nous proposerons une revue critique des modèles computationnels de Pritchard *et al.* (2018) et Ziegler *et al.* (2014) en faisant une description sommaire des hypothèses et mécanismes qu'ils implémentent. Nous présenterons ensuite les résultats obtenus par Perry, Zorzi et Ziegler (2019) qui utilisent le modèle de Ziegler *et al.* (2014) pour simuler les performances en lecture de dyslexiques. Nous terminerons par une discussion permettant de dégager les apports et limites de ces modélisations, afin d'éclairer la réflexion sur les pratiques pédagogiques et de remédiation de l'apprentissage orthographique.

L'hypothèse d'auto-apprentissage

Initialement proposée par Jorm et Share (1983), l'hypothèse de l'auto-apprentissage est conceptualisée par Share en 1995. Ce modèle théorique repose sur l'architecture des deux voies de lecture, directe (ou lexicale) et indirecte (ou sous-lexicale), postulées par les modèles

double-voie (Coltheart & Rastles, 1994 ; Coltheart, Rastle, Perry, Langdon & Ziegler, 2001). Il fait l'hypothèse principale que tout décodage réussi d'une séquence orthographique nouvelle donne l'occasion de mémoriser sa forme orthographique. A travers cette hypothèse, Share (1995) propose un modèle d'apprentissage orthographique dans lequel la construction de traces orthographiques en mémoire est progressive, incidente et dépendante des traitements phonologiques.

Le modèle d'auto-apprentissage peut être décrit au travers de trois caractéristiques majeures. Premièrement, le processus de reconnaissance des mots dépend du nombre de fois où le mot a été correctement décodé. En d'autres termes, lors de la première rencontre avec un mot nouveau, le lecteur va procéder à une lecture de ce mot par décodage phonologique via la voie sous-lexicale, et va commencer à mémoriser sa forme orthographique. Chaque nouvelle rencontre avec ce même mot est une occasion de renforcer la trace orthographique mémorisée. Plus la fréquence d'exposition au mot est élevée, plus la connaissance orthographique est bonne. On parle d'apprentissage item-dépendant ou *item-based*. Cette première hypothèse induit le développement simultané des deux voies de lecture : dès que le débutant lecteur a mémorisé quelques correspondances graphème-phonème qui lui permettent de décoder quelques mots, il commence à mémoriser l'orthographe lexicale des mots correctement décodés. Le décodage phonologique joue donc un rôle majeur lors des premières expositions à un mot. Son rôle décline ensuite progressivement, reflétant un apprentissage orthographique graduel et le recours de plus en plus fréquent à la voie lexicale.

Une seconde caractéristique principale de l'hypothèse d'auto-apprentissage concerne le développement de la voie sous-lexicale grâce aux connaissances orthographiques mémorisées. Share (1995) suggère que l'accroissement du lexique orthographique permet au lecteur débutant d'améliorer sa connaissance des règles de conversion grapho-phonémique. Même s'il ne connaît pas toutes les règles de conversion graphème-phonème nécessaires au décodage d'un mot, un lecteur débutant pourra quand même parfois trouver la bonne prononciation de ce mot. Cette lecture correcte permettra l'apprentissage de la forme orthographique du mot, et en retour la mise à jour des connaissances des correspondances graphème-phonème. L'auto-apprentissage est donc conçu comme une interaction à double sens entre la voie directe et indirecte : décoder permet d'accroître les connaissances orthographiques, qui renforcent et améliorent en retour le système de décodage.

Une troisième caractéristique de l'hypothèse d'auto-apprentissage concerne le rôle des traitements visuo-orthographiques. En effet, même si les traitements phonologiques constituent la pierre angulaire du processus d'apprentissage orthographique, Share reconnaît également que des traitements visuo-orthographiques sont impliqués. Cependant, il attribue à ces traitements un rôle secondaire. Selon son hypothèse, les traitements visuels seraient associés à la vitesse et la qualité de la mémorisation des représentations orthographiques mais resteraient dépendants d'un décodage phonologique réussi. Pour cette raison, les traitements visuo-orthographiques n'expliqueraient qu'une petite part de la variabilité inter-individuelle, la plus grande part étant liée aux capacités de traitement phonologique.

En résumé, l'hypothèse d'auto-apprentissage est un modèle conceptuel qui met en avant le rôle majeur du décodage grapho-phonémique dans l'acquisition du lexique orthographique. Ce modèle pose un cadre théorique fort, qui identifie les mécanismes cognitifs impliqués dans la construction du lexique orthographique. Cependant, comme tout modèle conceptuel, le modèle de l'auto-apprentissage ne spécifie pas de façon très précise la manière dont ces mécanismes interagissent. Par exemple, il ne décrit pas le fonctionnement exact de la relation de dépendance entre l'apprentissage orthographique et le traitement phonologique. Pour décrire plus précisément ce fonctionnement, et ainsi mieux comprendre cet apprentissage et les raisons possibles de son échec, la modélisation computationnelle paraît un outil particulièrement adapté.

Les modèles computationnels d'apprentissage orthographique

Très récemment, deux modélisations computationnelles de l'apprentissage de l'orthographe lexicale ont été publiées (Ziegler *et al.*, 2014 et Pritchard *et al.*, 2018), toutes deux issues de l'extension de modèles de lecture double-voie, respectivement, le modèle CDP (pour *Connectionist Dual Process*, e.g., Perry, Ziegler & Zorzi, 2007) et le modèle DRC (pour *Dual Route Cascaded Model*, Coltheart *et al.*, 2001). Les méthodes computationnelles – modèles mathématiques implémentés sur ordinateur – ont pour but de modéliser les fonctions cognitives par le biais de séquences de calculs. Ces modèles requièrent une grande clarté dans la spécification des hypothèses et, par conséquent, un degré de précision bien supérieur aux modèles conceptuels puisqu'ils nécessitent de préciser mathématiquement tous les paramètres en jeu. Ces modèles doivent pouvoir simuler aussi bien le fonctionnement cognitif normal que pathologique. Ainsi, un modèle computationnel d'apprentissage orthographique permettra de simuler l'apprentissage en condition normale, mais aussi en condition détériorée, afin d'identifier les compétences déficitaires responsables des troubles de l'apprentissage. Par l'ensemble de ces caractéristiques, les modèles computationnels sont d'une grande valeur heuristique.

La structure de ces deux modèles, de type double-voie, les rend particulièrement adaptés à l'implémentation de l'hypothèse d'auto-apprentissage avancée par Share (1995, 1999, 2004), qui était aussi fondée sur les modèles double-voie. L'hypothèse d'auto-apprentissage devrait donc pouvoir gagner en précision à la lumière de ces modélisations. Ces modèles sont construits sur l'hypothèse que la connaissance des relations graphème-phonème suffit à associer la représentation orthographique d'un nouveau mot à sa forme phonologique, synonyme d'un apprentissage orthographique réussi.

Structure générale des modèles et processus d'apprentissage

Ces modèles (Pritchard *et al.*, 2018 ; Ziegler *et al.*, 2014) implémentent des hypothèses théoriques similaires – auto-apprentissage orthographique grâce à deux voies de lecture – et permettent de simuler l'acquisition implicite des connaissances lexicales orthographiques chez le lecteur débutant. Ils possèdent une structure générale identique schématisée Figure 1.c dans laquelle nous retrouvons les deux voies de lecture. La voie lexicale (directe) est

constituée des lexiques orthographique et phonologique, associés au système sémantique (non représenté sur la Figure 1). Elle permet, grâce à un accès direct au lexique orthographique, de retrouver la prononciation d'un mot connu. La voie sous-lexicale (indirecte), quant à elle, est représentée par le système de conversion graphème-phonème. Ce système caractérise la connaissance et l'application des associations entre graphème et phonème permettant de générer une représentation phonologique du stimulus écrit.

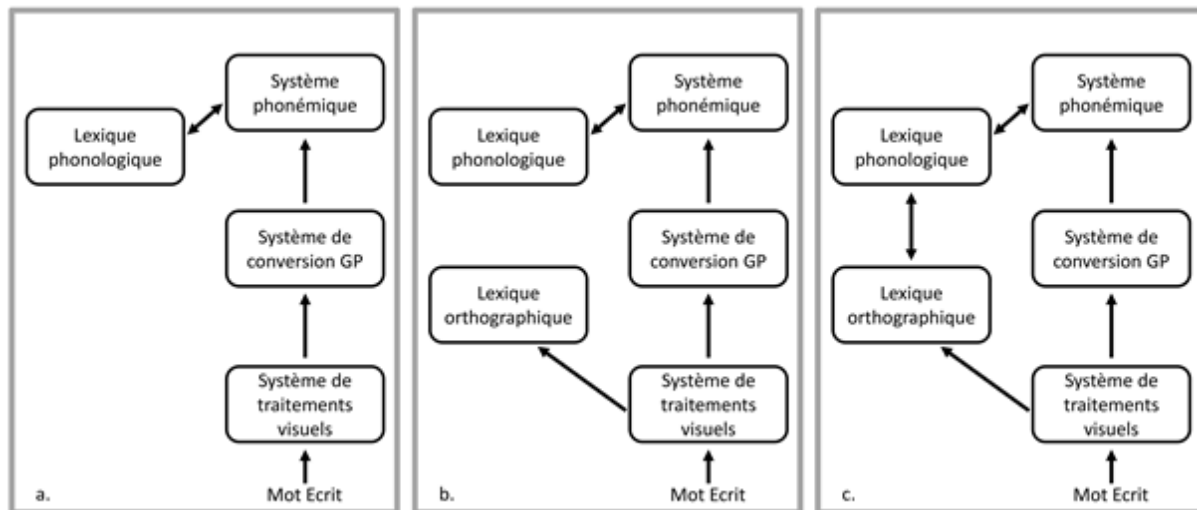


Figure 1. Représentation schématique des étapes du processus d'apprentissage implémenté dans les modèles computationnels d'apprentissage orthographique de Ziegler *et al.* (2014) et Pritchard *et al.* (2018). Ce schéma représente les différents modules (représentés par des rectangles) et leur connexion (flèches). Le décodage phonologique aboutit à l'activation d'un mot du lexique phonologique (a). La représentation orthographique du mot écrit présenté en entrée est mémorisée dans le lexique orthographique (b). Une connexion bi-directionnelle est créée entre les représentations phonologique et orthographique (c).

A l'état initial des modèles, représentant le moment du début de l'apprentissage de la lecture, les connaissances lexicales orthographiques sont inexistantes (lexique orthographique vide), et les connaissances phonologiques correspondent à la connaissance des formes orales de mots. Dans la voie sous-lexicale, les règles de conversion graphème-phonème sont connues totalement (modèle de Pritchard *et al.*, 2018) ou partiellement (Ziegler *et al.*, 2014 ; voir aussi Hutzler, Ziegler, Perry, Wimmer & Zorzi, 2004). A partir de cet état initial, lorsqu'un nouveau mot (stimulus) écrit est présenté au modèle, il est analysé par le système de traitements visuels situé en amont des deux voies de lecture. Ce système détecte les traits caractéristiques des lettres, permettant leur reconnaissance et l'identification des graphèmes qui composent le stimulus. Les deux modèles diffèrent légèrement sur ce dernier point. Le modèle de Pritchard *et al.* (2018) traite l'ensemble des lettres simultanément quelle que soit la longueur du stimulus, alors que celui de Ziegler *et al.* (2014) ne peut traiter au maximum que cinq lettres simultanément (fenêtre attentionnelle). Les systèmes de traitements visuels implémentés dans les deux modèles sont assez sommaires mais garantissent un codage parfait de la position et de l'identité de toutes les lettres composant le stimulus et son parfait découpage en graphèmes.

A la suite de l'étape de traitement visuel, le décodage phonologique s'effectue par l'application des associations graphème-phonème. Le décodage aboutit à l'activation de l'ensemble des phonèmes correspondant aux unités graphémiques du mot. Les phonèmes activés entraînent l'activation des représentations phonologiques des mots connus qui contiennent ces phonèmes (lexique phonologique, Figure 1.a). Lorsque l'activation d'une représentation phonologique dépasse un certain seuil, le modèle considère que le stimulus a été correctement lu, ce qui déclenche le processus d'apprentissage orthographique : la représentation orthographique du stimulus est stockée (lexique orthographique, Figure 1.b) et associée à la représentation phonologique activée dans le lexique phonologique (connexion bi-directionnelle, Figure 1.c).

Chaque nouvelle présentation d'un même mot aboutissant à un décodage correct via la voie sous-lexicale engendre une augmentation du paramètre reflétant sa fréquence. Tout mot déjà mémorisé est lu par la voie lexicale, et ce processus est d'autant plus rapide et performant que le mot est fréquent (donc a été lu un grand nombre de fois). Ainsi, conformément à la première caractéristique de l'hypothèse d'auto-apprentissage, l'apprentissage de ces modèles est bien item-dépendant, c'est-à-dire que la qualité de mémorisation orthographique d'un mot dépend de la fréquence d'exposition à ce même mot. Dans le modèle de Ziegler *et al.* (2014), la seconde caractéristique de l'hypothèse d'auto-apprentissage s'applique également, à savoir l'amélioration du système de règles de conversion graphème-phonème suite à un décodage réussi. Autrement dit, après chaque décodage réussi, le modèle renforce et développe, rétroactivement, sa connaissance des règles de conversion grapho-phonémique, conduisant à l'amélioration du décodage et donc à l'augmentation du nombre de nouveaux mots appris.

En résumé, la structure de ces modélisations computationnelles leur permet de refléter la principale caractéristique de l'hypothèse de l'auto-apprentissage : la capacité de mémoriser les formes lexicales orthographiques correctement décodées. Le modèle de Ziegler *et al.* (2014) prévoit également, en retour, l'amélioration des compétences de décodage. Cependant on peut relever que, alors que le système de traitement phonologique et de décodage est assez élaboré dans ces modélisations, le système de traitement visuel est assez sommairement simulé. En effet, le fait qu'un stimulus soit systématiquement toujours parfaitement segmenté en graphèmes et que le modèle mémorise toujours parfaitement l'identité et la position de toutes les lettres du stimulus, semblent assez éloignés des caractéristiques du traitement visuel des débutants lecteurs.

Principaux résultats de simulations de l'apprentissage orthographique

Les modèles de Ziegler *et al.* (2014) et Pritchard *et al.* (2018) apprennent avec succès la représentation orthographique, respectivement, de plus de 80 % des mots et de plus de 95 % des mots réguliers. Cependant, ces modèles ont des difficultés dans l'apprentissage de mots irréguliers. En effet, aucun d'eux n'est appris par le modèle de Pritchard *et al.* (2018). Ziegler *et al.* (2014) concluent que l'absence d'apprentissage observé pour 20 % des nouveaux mots présentés au modèle pourrait être liée à l'opacité de la langue anglaise. Pour améliorer les

performances du modèle, Ziegler *et al.* (2014) évoquent le recours au contexte : pour eux, l'exposition aux mêmes mots à travers des contextes variés devrait permettre de lever toute ambiguïté sur la correspondance lettre-son des mots « difficiles à apprendre ». Dans une version plus récente du modèle, Perry *et al.* (2019) ajoutent un mécanisme permettant au modèle d'apprendre les mots irréguliers non appris par décodage phonologique. Ce mécanisme modélise l'apprentissage par instruction directe ou apprentissage explicite obtenu, par exemple, grâce à l'utilisation de *flash cards* (Perry *et al.*, 2019). Ainsi, lorsque l'auto-apprentissage par décodage phonologique échoue, un apprentissage direct de la forme orthographique lexicale est déclenché : le mot est alors mémorisé globalement, sans recours à son décodage préalable.

Pritchard *et al.* (2018) supposent également que l'absence d'apprentissage observée majoritairement pour les mots irréguliers est liée à l'absence de contexte sémantique. Pour pallier à cette difficulté, ils ont implémenté une version simplifiée du système sémantique. Ce système est connecté au lexique et permet l'association des mots mémorisés avec leur représentation sémantique. Ce module est systématiquement activé, quel que soit le stimulus présenté. L'activation de la représentation sémantique du mot est fonction des informations fournies par le contexte. Ainsi, bien que ce modèle simule la lecture de mots isolés, il intègre un paramètre représentant la quantité d'informations sémantiques disponibles, issues, par exemple, de la lecture d'un texte. La valeur de ce paramètre peut être assimilée à la prédictibilité du mot présenté. Ainsi, plus l'activation de la représentation sémantique est élevée, plus le mot est prédictible, favorisant sa reconnaissance même en cas d'échec de décodage. Les résultats obtenus par Pritchard *et al.* (2018) sont en accord avec les données comportementales montrant 1/ que l'orthographe de nouveaux mots réguliers présentés isolément (c'est-à-dire sans contexte) peut être mémorisée efficacement (Bosse, Chaves, Largy & Valdois, 2015 ; Nation, Angell & Castles, 2007 ; Share, 1999) et 2/ qu'un contexte de lecture précis a un effet bénéfique uniquement sur l'apprentissage de mots irréguliers (Wang, Castles, Nickels & Nation, 2011).

Pour évaluer l'importance relative des systèmes de traitements visuels et de conversion graphème-phonème implémentés sur l'apprentissage orthographique, Ziegler *et al.* (2014) réalisent deux séries de simulations. Chacune permet de simuler le déficit d'un processus, visuel ou phonologique. Un traitement visuel déficitaire est simulé par une probabilité que chaque lettre composant le mot soit échangée avec la lettre suivante (exemple : *CAT* devenant *ACT*). Un traitement phonologique déficitaire est simulé par une probabilité d'erreur de décodage, c'est à dire par modification du phonème généré en sortie du système de conversion graphème-phonème. Les résultats obtenus sont en accord avec la troisième caractéristique de l'hypothèse d'auto-apprentissage, montrant un rôle majeur du traitement phonologique et un rôle secondaire du traitement visuel. En effet, seulement 8 % des mots sont appris correctement lorsque le modèle simule un apprentissage perturbé phonologiquement. Par contre, le modèle apprend encore environ 70 % des mots présentés lorsqu'un déficit visuel jugé important est simulé. Ziegler *et al.* (2014) en concluent que seul le dysfonctionnement phonologique a un effet majeur sur la performance et que les capacités phonologiques sont indispensables à l'apprentissage orthographique.

En résumé, les simulations de l'apprentissage orthographique à partir d'un système de correspondances graphème-phonème, apprennent bien les mots réguliers mais échouent à mémoriser de nombreux mots irréguliers. Pour améliorer leurs performances d'apprentissage sur ce type de mots, il faut leur ajouter un système d'apprentissage direct, qui mémorise la forme orthographique des mots grâce au contexte ou à l'instruction directe, sans nécessité de décodage correct. Les simulations de déficits suggèrent un rôle majeur du traitement phonologique et un rôle presque négligeable du traitement visuel.

Simulation des différences inter-individuelles : vers l'hypothèse d'un trouble dyslexique multi-déficitaire

Dans une étude récente, Perry *et al.* (2019) évaluent la capacité du modèle de Ziegler *et al.* (2014) à rendre compte des différences inter-individuelles dans les performances en lecture de mots réguliers, irréguliers et pseudo-mots. Pour cela, ils utilisent les résultats comportementaux de 622 enfants anglophones – dont 388 dyslexiques – décrits par Peterson, Pennington, et Olson (2013). Dans un premier temps, les performances de chaque enfant dans trois tâches comportementales (choix orthographique, suppression phonémique, vocabulaire) sont utilisées, avant apprentissage, pour créer un modèle unique, par ajustement des paramètres du modèle. Ce sont donc autant de modèles différents générés que d'enfants dans l'étude. Les résultats obtenus par chaque enfant dans la tâche de choix orthographique permettent de moduler les connaissances lexicales orthographiques initiales et la capacité à mémoriser la représentation orthographique d'un nouveau mot. Les performances du module de traitement phonologique sont modulées par les résultats de l'enfant dans la tâche de suppression phonémique. Enfin, la taille du lexique phonologique est fonction du score de l'enfant en vocabulaire. Ainsi, chaque modèle initial est ajusté aux performances de l'enfant dans les dimensions orthographiques, phonologiques et de vocabulaire.

Après cet ajustement des paramètres aux performances de chaque enfant, une phase complète d'auto-apprentissage du corpus de mots est réalisée pour chacun des modèles. Ensuite, les résultats obtenus par chaque modèle en lecture de mots réguliers, irréguliers et non-mots sont comparés aux résultats des enfants sur la lecture de ces mêmes mots, reportés par Peterson *et al.* (2013). Les résultats indiquent que les modèles permettent de simuler avec succès les performances en lecture aussi bien des normo-lecteurs que des dyslexiques. L'ajustement des paramètres (orthographique, phonologique et vocabulaire) du modèle en fonction des scores obtenus par les enfants a permis de rendre compte des différences inter-individuelles observées en lecture de mots réguliers, irréguliers et de non mots (corrélations entre scores simulés et scores observés, respectivement : $r^2 = .67$, $r^2 = .72$ et $r^2 = .63$).

L'analyse des performances de chaque modèle au cours de la phase d'apprentissage montre que plus le niveau de lecture (c'est-à-dire, de décodage par la voie sous-lexicale) est bon, plus l'auto-apprentissage orthographique est performant, réduisant par la même occasion le nombre de mots appris par le module simulant l'instruction directe. Cette observation est une nouvelle confirmation de l'hypothèse d'auto-apprentissage, qui n'est performant que si le

décodage l'est aussi. Selon Perry *et al.* (2019), ces observations sont cohérentes avec les conclusions de Gentaz, Sprenger-Charolles, Theurel et Colé (2013) qui suggèrent que les bons lecteurs sont de bons décodeurs et que les lecteurs les plus faibles ont davantage de difficultés dans le décodage phonologique.

L'un des intérêts des méthodes computationnelles est qu'elles permettent de comparer plusieurs types de modèles, donc plusieurs hypothèses, pour déterminer laquelle est la plus en accord avec les observations comportementales. Les auteurs ont utilisé ce principe pour déterminer quel type de déficit rendait le mieux compte des profils des enfants dyslexiques. Les résultats des modèles multi-déficits ajustés aux performances des dyslexiques sont comparés à ceux obtenus par trois autres modèles alternatifs. Le premier présente un déficit purement visuel (inversion de lettres), le second, un déficit purement phonologique (erreurs de conversion graphème-phonème), et le troisième est un modèle bruité globalement, représentant un traitement général déficitaire (ajout de bruit dans chaque composant du modèle). Les résultats obtenus montrent qu'à l'exception du modèle bruité, l'ensemble des modèles simulent les performances moyennes en lecture de mots réguliers, irréguliers et non mots aussi bien des normo-lecteurs que des dyslexiques. Cependant, une analyse des résultats individuels faite pour chaque dyslexique montre que le modèle multi-déficits permet une meilleure simulation des performances individuelles que les modèles à déficit visuel ou à déficit phonologique (respectivement, tous types d'items confondus, $r^2 = .71$, $r^2 = .59$ et $r^2 = .64$). Selon Perry *et al.* (2019), ces résultats suggèrent que la dyslexie pourrait être associée à de multiples déficits.

Dans une dernière série de simulations, Perry *et al.* (2019) utilisent leur modèle pour prédire l'évolution des performances en lecture de mots réguliers, irréguliers et non mots des 100 dyslexiques les plus faibles, en fonction de l'amélioration d'un type de traitement : soit orthographique, soit phonologique, soit du vocabulaire. L'ajustement des paramètres des modèles de chaque enfant permet aux auteurs de simuler, une à une, une augmentation progressive des scores 1/ dans la tâche de choix orthographique, 2/ dans la tâche de suppression phonémique et 3/ en vocabulaire. Globalement, les résultats obtenus montrent que l'augmentation des performances sur chacune des dimensions engendre, séparément, une amélioration des compétences en lecture, quel que soit le type de mots. Ces prédictions sont cohérentes avec les précédents résultats suggérant que les troubles d'apprentissage de la lecture sont associés à des déficits multiples et non à un mécanisme déficitaire unique. Cependant, deux cas prédisent une très faible amélioration du niveau de lecture. D'une part, une meilleure application/connaissance des règles de conversion graphème-phonème ne prédit pas une amélioration des performances en lecture de mots irréguliers. Ce résultat est tout à fait cohérent avec le fonctionnement général du modèle qui a besoin d'un système d'instruction directe ou de prise en compte du contexte sémantique pour apprendre les mots irréguliers. D'autre part, une augmentation du vocabulaire ne permet qu'une très faible augmentation du niveau de lecture des non mots, ce qui paraît aussi tout à fait logique. Finalement, seule une augmentation des performances orthographiques prédit une amélioration globale du niveau de lecture de mots réguliers, irréguliers et des non mots. Comme le suggèrent de nombreuses données comportementales (*e.g.*, Castles *et al.*, 2018 ;

Chaves, Totereau & Bosse, 2012), ces simulations confirment que les capacités de traitement orthographique sont un élément fondamental dans le développement de la lecture des mots irréguliers, mais aussi de tous les autres types de mots.

Discussion : apports et limites des modélisations computationnelles de l'auto-apprentissage

A travers plusieurs séries de simulations, Ziegler *et al.* (2014) et Pritchard *et al.* (2018) ont évalué la capacité de leur modèle computationnel respectif, à simuler l'acquisition de connaissances lexicales orthographiques chez le lecteur débutant. Développé à partir des modèles double-voie, le mécanisme de décodage phonologique qu'ils implémentent constitue le point fort de ces modèles. Les représentations phonologiques pré-existantes et la connaissance préalable, même minimaliste, des relations graphème-phonème suffisent à mémoriser correctement la trace orthographique de nouveaux mots, majoritairement, réguliers. Compte-tenu de leur structure de type double-voie, les résultats obtenus confirment, sans surprise, l'hypothèse d'un rôle fondamental des traitements phonologiques dans l'acquisition des connaissances orthographiques lexicales.

Cependant, si le décodage phonologique leur permet de simuler l'apprentissage de la représentation orthographique d'un grand nombre de mots réguliers, ces modélisations engendrent un grand nombre d'erreurs d'apprentissage issues d'un décodage incorrect face aux irrégularités graphémiques. Seul un mécanisme additionnel, simulant l'apport du contexte sémantique ou de l'instruction directe sans décodage, permet de pallier aux difficultés rencontrées par le système de décodage phonologique, face aux mots irréguliers. Ces observations remettent en question, au moins pour les langues comportant beaucoup d'irrégularités comme le français, l'idée selon laquelle les débuts de l'apprentissage de la lecture ne doivent comporter que des activités de décodage et doivent exclure toute autre approche, comme par exemple l'apprentissage de « mots-outils » ou la lecture de textes qui ne sont pas « 100% décodables » par l'enfant en classe de CP (MEN, 2018). Outre l'absence de preuves comportementales en faveur de cette exclusivité du décodage (e.g., Castles *et al.*, 2018), ces modélisations computationnelles de l'apprentissage suggèrent également un intérêt certain à l'utilisation du contexte et de l'instruction directe, en complément de l'enseignement du décodage bien sûr, pour lire et apprendre les mots irréguliers.

L'utilisation d'un modèle computationnel d'auto-apprentissage (Ziegler *et al.*, 2014) pour simuler les performances inter-individuelles de normo-lecteurs et de dyslexiques apporte des résultats également très intéressants (Perry *et al.*, 2019). Les scores obtenus par chaque enfant au cours de 3 tâches comportementales – choix orthographique, suppression phonémique et vocabulaire – sont utilisés pour ajuster différents paramètres du modèle, aux niveaux de la mémoire orthographique, du système de décodage grapho-phonémique et du lexique phonologique. Les simulations montrent que ces modèles ajustés aux performances de l'enfant reflètent très bien leurs capacités de lecture. Pour les enfants dyslexiques, ces modèles ajustés s'apparentent à des modèles multi-déficits (c'est-à-dire, pouvant présenter un ou plusieurs systèmes déficitaires). Les comparaisons de différents types de déficits

démontrent que les modèles multi-déficits simulent mieux les performances des dyslexiques que les modèles à déficit unique, qu'il soit visuel ou phonologique. Ces observations suggèrent une complexité des facteurs sous-jacents aux troubles de l'apprentissage de la lecture, remettant en question les classifications actuelles qui tendent à associer la dyslexie à un trouble spécifique et unique, principalement phonologique. L'hypothèse d'un trouble multi-déficitaire (voir aussi Ziegler, Perry & Zorzi, 2019) suggère qu'une remédiation agissant sur plusieurs niveaux pourrait être plus adaptée qu'une remédiation uniquement phonologique. En conséquence également, ces résultats soulignent l'importance d'évaluer les enfants dyslexiques sur de nombreuses dimensions incluant le vocabulaire, les traitements orthographiques et les traitements phonologiques, pour construire une remédiation adaptée à chacun.

Si les résultats obtenus suggèrent que les méthodes computationnelles pourraient contribuer à la compréhension des mécanismes cognitifs impliqués dans l'apprentissage orthographique, certaines particularités de ces modèles sont cependant discutables. Un premier point de discussion concerne le mécanisme de traitement visuel implémenté, qui, comme le reconnaissent Pritchard *et al.*, (2018), semble minimaliste. L'implémentation ne reflète pas les limites du traitement parallèle des lettres dues à l'acuité visuelle, au phénomène d'interférence (ou *crowding*) ou encore à l'attention visuelle. Par conséquent, les simulations de déficits visuels par le modèle de Ziegler *et al.* (2014), qui montrent un effet relativement mineur de ces déficits sur l'apprentissage, pourraient être la simple conséquence de la sous-spécification des traitements visuels dans le modèle. De plus, le déficit visuel simulé est un déficit d'encodage positionnel : les lettres du mot présenté au modèle lors de l'apprentissage sont identiques à celles du nouveau mot mais l'ordre des lettres est modifié. Or, les théories visuelles de la dyslexie, basées sur des observations comportementales, suggèrent soit des déficits de bas niveau dans le cadre de la théorie magnocellulaire (Stein, 2014), soit un déficit de l'orientation spatiale (Facoetti & Molteni, 2001) soit un déficit du traitement simultané de plusieurs éléments ou trouble de l'empan visuo-attentionnel (Bosse, Tainturier & Valdois, 2007). Le trouble visuel simulé dans ces modèles ne correspond à aucune de ces théories et semble donc assez peu adapté pour apporter une conclusion sur l'impact des troubles visuels dans la dyslexie. Pour cela, des modélisations rendant mieux compte des caractéristiques du traitement visuel des mots écrits seront plus adaptées (*e.g.*, Ginestet, Valdois & Diard, 2019).

Par ailleurs, la sous-spécification des niveaux de traitement visuel s'accompagne, dans ces modélisations, d'un traitement simultané et d'un encodage parfait de la position et de l'identité de toutes les lettres des mots. Dès qu'elle est mémorisée, la trace orthographique ne contient aucune erreur, quelle que soit sa longueur ou sa structure orthographique (nombre de graphèmes ambigus). Bien que plusieurs études aient montré qu'un petit nombre de présentations (entre 1 et 4) suffit pour amorcer un apprentissage orthographique de mots (Nation *et al.*, 2007 ; Share, 2004), l'acquisition parfaite de l'information orthographique dès la première lecture, ne semble pas plausible. En effet, les données oculométriques reportées dans de récentes études (Joseph, Wonnacott, Forbes & Nation, 2014 ; Joseph & Nation, 2018) montrent une évolution du traitement visuo-orthographique au cours des présentations,

suggérant une acquisition graduelle de la trace orthographique lexicale d'un nouveau mot au cours de ses lectures successives.

Un dernier point de discussion concerne la définition de l'apprentissage orthographique. A travers ces modèles, l'apprentissage orthographique résulte de la création d'une connexion entre une représentation orthographique et sa représentation phonologique correspondante. Dans le modèle de Ziegler *et al.* (2014) – et en l'absence de contexte dans le modèle de Pritchard *et al.* (2018) –, seul un décodage réussi permet l'activation de la représentation phonologique correspondant à la séquence des lettres présentées en entrée. De cette définition découle une propriété forte. En effet, cela implique que pour être mémorisée, la représentation phonologique du mot lu (c'est-à-dire, présenté à l'écrit) doit être connue. Ces modèles sont donc incapables de mémoriser la trace orthographique d'un nouveau mot jamais traité oralement, ce qui correspond à la situation générale, dans laquelle le lecteur débutant connaît les mots sous leur forme orale avant d'en voir la forme écrite. Cependant, des données comportementales montrent que des lecteurs débutants (pour quelques exemples, voir Bosse *et al.*, 2015 ; Nation *et al.*, 2007 ; Share, 1999, 2004 ; Tucker, Castles, Laroche & Deacon, 2016) et experts sont capables de mémoriser correctement la représentation orthographique de pseudo-mots : ces deux modèles sont en l'état incapables de rendre compte de cette situation.

Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté les résultats et le fonctionnement de 2 récents modèles computationnels d'apprentissage orthographique (Ziegler *et al.*, 2014 ; Pritchard *et al.*, 2018). Bien que ces modèles ne reflètent pas de façon plausible l'ensemble des mécanismes cognitifs impliqués (notamment les traitements visuels), la grande clarté dans la spécification des hypothèses implémentées – et les résultats obtenus – apportent de nouvelles informations sur les mécanismes cognitifs impliqués dans l'acquisition de nouvelles connaissances orthographiques lexicales et par extension, dans le processus d'apprentissage de la lecture. Développés à partir de modèles de type double-voie, ces modèles implémentent et simulent avec succès l'auto-apprentissage (Share, 1995, 1999, 2004).

Deux résultats sont apparus particulièrement intéressants tant ils ouvrent de nouvelles pistes de réflexion pour la pratique pédagogique et la remédiation des troubles de la lecture. Tout d'abord, l'apprentissage de nouveaux mots irréguliers n'est rendu possible que par l'apport d'un contexte sémantique précisé ou par instruction directe. Cela suggère qu'un apprentissage orthographique basé uniquement sur le décodage phonologique n'est pas réaliste. Les résultats de Perry *et al.* (2019) suggèrent quant à eux que la dyslexie serait associée à un déficit multi-niveaux, et donc que l'évaluation non seulement des capacités phonologiques mais aussi des traitements orthographiques et du vocabulaire, est primordiale. En cas de déficits multiples, une remédiation sur l'ensemble de ces dimensions pourrait être préconisée.

Bien qu'il faille rester prudent sur l'interprétation des premiers résultats discutés ici, le développement de modélisations computationnelles spécifiquement construites pour rendre

compte de l'apprentissage est sans doute une voie de recherche très prometteuse qui pourrait, à terme, offrir de nouvelles perspectives tant au niveau de la recherche que dans la pratique professionnelle de l'enseignement et de la remédiation des troubles de l'apprentissage de l'orthographe lexicale.

Références

Ans, B., Carbonnel, S. & Valdois, S. (1998). A connectionist multiple-trace memory model for polysyllabic word reading. *Psychological Review*, 105(4), 678–723.

Bosse, M.-L., Chaves, N., Largy, P. & Valdois, S. (2015). Orthographic learning during reading: The role of whole-word visual processing. *Journal of Research in Reading*, 38(2), 141–158.

Bosse, M.-L., Tainturier, M. J. & Valdois, S. (2007). Developmental dyslexia: The visual attention span deficit hypothesis. *Cognition*, 104(2), 198–230.

Brissaud, C., Cogis, D., Jaffré, J. P., Pellat, J. C. & Fayol, M. (2011). *Comment enseigner l'orthographe aujourd'hui?*. Paris: Hatier.

Castles, A., Rastle, K. & Nation, K. (2018). Ending the reading wars: Reading acquisition from novice to expert. *Psychological Science in the Public Interest*, 19, 5–51.

Chaves, N., Totereau, C. & Bosse, M.-L. (2012). Acquérir l'orthographe lexicale: quand savoir lire ne suffit pas. *ANAE – Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez L'Enfant*, 118, 271–279.

Coltheart, M. & Rastle, K. (1994). Serial processing in reading aloud: Evidence for dual-route models of reading. *Journal of Experimental Psychology: human perception and performance*, 20(6), 1197.

Coltheart, M., Rastle, K., Perry, C., Langdon, R. & Ziegler, J. C. (2001). DRC: A dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological Review*, 108(1), 204–256.

Facoetti, A. & Molteni, M. (2001). The gradient of visual attention in developmental dyslexia. *Neuropsychologia*, 39(4), 352–357.

Gentaz, E., 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.

- Ginestet, E., Valdois, S. & Diard, J. (2019). Bayesian modeling of lexical knowledge acquisition in BRAID, a visual word recognition model. *European Society for Cognitive Psychology*, 25-28 September, Tenerife, Spain.
- Hutzler, F., Ziegler, J. C., Perry, C., Wimmer, H. & Zorzi, M. (2004). Do current connectionist learning models account for reading development in different languages? *Cognition*, 91(3), 273–296.
- Jorm, A. F. & Share, D. L. (1983). An invited article: Phonological recoding and reading acquisition. *Applied psycholinguistics*, 4(2), 103–147.
- Joseph, H. & Nation, K. (2018). Examining incidental word learning during reading in children: The role of context. *Journal of Experimental Child Psychology*, 166, 190–211.
- Joseph, H., Wonnacott, E., Forbes, P. & Nation, K. (2014). Becoming a written word: Eye movements reveal order of acquisition effects following incidental exposure to new words during silent reading. *Cognition*, 133(1), 238–248.
- Ministère de l'Éducation Nationale (MEN) (2018). *Un guide fondé sur l'état de la recherche, pour enseigner la lecture et l'écriture au CP*. Disponible en ligne sur https://www.education.gouv.fr/cid129644/4-priorites-pour-renforcer-la-maitrise-des-fondamentaux.html#Pour_enseigner_la_lecture_et_l_écriture_au_CP_telechargez_le_guide
- Nation, K., Angell, P. & Castles, A. (2007). Orthographic learning via self-teaching in children learning to read English: Effects of exposure, durability, and context. *Journal of Experimental Child Psychology*, 96(1), 71–84.
- Peterson, R. L., Pennington, B. F. & Olson, R. K. (2013). Subtypes of developmental dyslexia: Testing the predictions of the dual-route and connectionist frameworks. *Cognition*, 126(1), 20–38.
- 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.
- Perry, C., Zorzi, M. & Ziegler, J. C. (2019). Understanding dyslexia through personalized large-scale computational models. *Psychological science*, 30(3), 386–395.
- Pritchard, S. C., Coltheart, M., Marinus, E. & Castles, A. (2018). A computational model of the self-teaching hypothesis based on the dual-route cascaded model of reading. *Cognitive Science*, 1–49.
- Seidenberg, M. S. & McClelland, J. L. (1989). A distributed, developmental model of word recognition and naming. *Psychological Review*, 96(4), 523–568.

Share, D. L. (1995). Phonological recoding and self-teaching: Sine qua non of reading acquisition. *Cognition*, 55(2), 151–218.

Share, D. L. (1999). Phonological recoding and orthographic learning: A direct test of the self-teaching hypothesis. *Journal of Experimental Child Psychology*, 72(2), 95–129.

Share, D. L. (2004). Orthographic learning at a glance: On the time course and developmental onset of self-teaching. *Journal of Experimental Child Psychology*, 87(4), 267–298.

Stein, J. (2014). Dyslexia: the role of vision and visual attention. *Current developmental disorders reports*, 1(4), 267–280.

Tucker, R., Castles, A., Laroche, A. & Deacon, H. (2016). The nature of orthographic learning in self-teaching: Testing the extent of transfer. *Journal of Experimental Child Psychology*, 145, 79–94.

Wang, H.-C., Castles, A., Nickels, L. & Nation, K. (2011). Context effects on orthographic learning of regular and irregular words. *Journal of Experimental Child Psychology*, 109(1), 39–57.

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 of London B: Biological Sciences*, 369(1634), 20120397.

Ziegler, J. C., Perry, C. & Zorzi, M. (2019). 16 Modeling the Variability of Developmental Dyslexia. *Developmental Dyslexia across Languages and Writing Systems*, 350.