



**HAL**  
open science

# Conception et évaluation d'Evasion, un logiciel éducatif d'entraînement des capacités d'attention visuelle impliquées en lecture.

Svetlana Meyer

## ► To cite this version:

Svetlana Meyer. Conception et évaluation d'Evasion, un logiciel éducatif d'entraînement des capacités d'attention visuelle impliquées en lecture.. Psychologie. Ecole doctorale: Ingenierie pour la sante la Cognition et l'Environnement, 2019. Français. NNT: . tel-02089447

**HAL Id: tel-02089447**

**<https://theses.hal.science/tel-02089447>**

Submitted on 3 Apr 2019

**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.

## THÈSE

Pour obtenir le grade de

### **DOCTEUR DE LA COMMUNAUTÉ UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES**

Spécialité : **PCN - Sciences cognitives, psychologie et neurocognition**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

**Svetlana MEYER**

Thèse dirigée par **Sylviane VALDOIS**, DR CNRS  
et codirigée par **Julien DIARD**, CR CNRS

préparée au sein du **Laboratoire de Psychologie et NeuroCognition**  
et de l' **École doctorale « Ingénierie pour la Santé, la Cognition et l'Environnement »**

## **Conception et évaluation d'Evasion, un logiciel éducatif d'entraînement des capacités d'attention visuelle impliquées en lecture.**

Thèse soutenue publiquement le **22 janvier 2019**

Jury composé de :

**Monsieur ERIC SIÉROFF**

PROFESSEUR, UNIVERSITÉ PARIS DESCARTES, Rapporteur

**Monsieur MICHEL FAYOL**

PROFESSEUR ÉMÉRITE, UNIVERSITÉ BLAISE PASCAL, Rapporteur

**Monsieur EDOUARD GENTAZ**

PROFESSEUR ORDINAIRE, UNIVERSITÉ DE GENÈVE, SUISSE, Président

**Madame DAPHNÉ BAVELIER**

PROFESSEURE, UNIVERSITÉ DE GENÈVE, SUISSE, Examinatrice

**Monsieur PIERRE-YVES OUDEYER**

DIRECTEUR DE RECHERCHE, INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE EN INFORMATIQUE ET EN AUTOMATISATION, Examineur

**Madame SYLVIANE VALDOIS**

DIRECTRICE DE RECHERCHE, CNRS DÉLÉGATION ALPES, Directeur de thèse

**Monsieur JULIEN DIARD**

CHARGÉ DE RECHERCHE, CNRS DÉLÉGATION ALPES, Co-Directeur de thèse





# Résumé—Abstract

## Français

Apprendre à lire est une activité complexe qui s'appuie sur différentes capacités cognitives, dont l'attention visuelle. Absente des programmes scolaires, le rôle de l'attention visuelle pour l'apprentissage de la lecture est pourtant largement documenté dans la littérature scientifique. Dans cette thèse, nous avons donc conçu un logiciel éducatif original d'entraînement de l'attention visuelle, Evasion, et évalué l'impact de son utilisation au sein de la classe.

Pour ce faire, une revue de littérature a été menée pour identifier plus précisément quelles sont les dimensions de l'attention visuelle impliquées en lecture et comment les entraîner au mieux. Un cadre conceptuel théorique que nous avons développé permet d'interpréter ces éléments et suggère que les dimensions à cibler sont la quantité totale d'attention visuelle et sa dispersion dans l'espace. Ces deux dimensions semblent particulièrement bien entraînées par les jeux vidéo d'action, dont l'effet sur l'attention visuelle a été lui aussi expliqué dans le cadre de notre modèle.

Pour les entraîner au mieux au sein d'Evasion, nous avons mêlé les tâches, dont l'effet sur ces dimensions a été validé, avec les propriétés des jeux vidéo d'action. Notre logiciel prend la forme de quatre mini-jeux, dont les propriétés s'ajustent au niveau de l'élève grâce à un algorithme d'adaptation de la difficulté développé par notre équipe. Evasion devait être utilisé en classe pendant 10 h au total, à raison de 3 sessions hebdomadaires de 20 minutes. L'expérimentation a porté sur 730 élèves de CP répartis en deux groupes d'entraînement. Les deux groupes étaient appariés quant à leurs compétences cognitives avant entraînement. En post-entraînement, les performances du groupe Evasion ont été comparées à celles du groupe contrôle, qui recevait un entraînement de la compréhension orale en anglais.

Les résultats de cette expérience écologique montrent que les capacités d'attention visuelle et de lecture ne progressent pas davantage suite à l'utilisation d'Evasion que suite à l'utilisation d'un entraînement contrôle. Des analyses supplémentaires révèlent que le protocole a été peu suivi en classe, et que le temps d'entraînement est un facteur expliquant l'amplitude de l'amélioration des dimensions attentionnelles ciblées. Par ailleurs, il semblerait que les entraînements proposés aient été trop faciles. Ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives sur les améliorations à apporter à notre logiciel et, plus généralement, sur les conditions de mise en œuvre d'expériences écologiques dont les besoins sont spécifiques.

**Mots-clef :** logiciel éducatif, attention visuelle, apprentissage de la lecture, jeux vidéo d'action

## English

Learning to read is a complex activity that relies on different cognitive abilities, including visual attention. The role of visual attention in learning to read is widely documented in the scientific literature but absent from school curricula. In this thesis work, we designed an original educational software, called Evasion, for visual attention training in the classroom and we evaluated its impact on beginning readers' performance.

A literature review was first conducted to identify the dimensions of visual attention that are involved in reading and how best to train them. We then propose a conceptual framework which allows us to interpret these results. We conclude that the dimensions to be targeted are the total amount of visual attention resources and attention spatial dispersion. These two facets of attention seem to be particularly well driven by action video games, whose effect on visual attention has also been characterized in our model.

To train visual attention resources and dispersion as well as possible within Evasion, we have mixed the tasks known to improve these attentional dimensions with the properties of action video games. Our software includes four training mini-games and an adaptive difficulty algorithm developed by our team to adjust the game properties online to the child needs. The training program was provided in classroom over a period of ten weeks at a rate of three 20-minute sessions a week. It was proposed to a large sample of 730 beginning readers for reading difficulty prevention.

The impact of Evasion was assessed before and after training as compared to a control group that used an intervention program conceived to improve oral comprehension in English. The results of this ecological experiment show that visual attention and reading did not improve more following Evasion than control training. Additional analyses revealed that training time was poorly respected while this factor relates to the magnitude of improvement in the attentional dimensions we targeted. The analyses further suggest a problem in the level of difficulty of the mini-games. Overall, our work opens up new perspectives on the improvements to be made to our software and, above all, on the conditions for successful implementation of ecological experiments.

**Keywords :** educational software, visual attention, reading acquisition, action video games



# Remerciements

Nombreuses sont les personnes qui de différentes manières ont permis à mes travaux de voir le jour. Je tiens à leur adresser ici mes plus sincères remerciements.

Mes remerciements vont tout d'abord à mes directeurs de thèse, Sylviane Valdois et Julien Diard. L'encadrement qu'ils m'ont apporté est d'une qualité rare, conjuguant avec justesse exigence, bienveillance, rigueur et humour. Ils m'ont donné la chance de travailler sur un projet passionnant pour lequel ils se sont investi au delà de l'ordinaire. Ils m'ont accordé une grande liberté, qui ne s'est jamais transformée en solitude. A mes yeux, ils sont donc un exemple de pédagogie et d'excellence scientifique. Pour cela et tout ce qu'ils m'ont appris, je les remercie.

L'ampleur du projet FLUENCE a nécessité la contribution d'un grand nombre de personnes pour en superviser les aspects scientifiques et organisationnels. En premier lieu, je tiens à remercier Sonia Mandin, cheffe du projet Fluence, dont le sérieux, la rigueur et le pragmatisme ont été déterminants pour son bon déroulement. Je remercie ensuite les différents membres de société Xiwen Studio pour leur créativité et leur sens de l'adaptation face aux besoins de notre projet, si particuliers par rapport à la temporalité habituelle de l'entreprise. Les statisticiens du projet Matthieu Rolland et Alexandre Seillet m'ont plusieurs fois aidée grâce à leur expérience de l'analyse de données. Ils m'ont convaincue qu'un projet de ce type ne peut se passer de leur secours et je les en remercie. Je remercie bien sûr tous les nombreux vacataires, qui sont sillonné l'académie pour collecter les données expérimentale que j'ai analysées : leur professionnalisme va au delà de leur condition. Enfin, mes remerciements vont aux enseignants qui se sont portés volontaires pour participer à notre expérimentation : leur enthousiasme et le temps qu'ils ont bien voulu nous accorder nous ont été précieux.

J'ai beaucoup apprécié ces trois années de thèse passées au Laboratoire de Psychologie et NeuroCognition. La gentillesse et l'intelligence de mes collègues les ont rendues aussi joyeuses que stimulantes. Je suis fière d'avoir côtoyé de tel.le.s chercheur.se.s passionné.e.s et humbles qui, quel que soit leur âge, donnent à ce métier tout son sens. Merci à eux pour leur bel exemple, la science leur doit beaucoup.

Évidemment, la vie continue au delà du laboratoire, et je remercie tous les amis qui m'ont épaulée : ceux de l'aventure BeyondLab, ceux de Grenoble et de Paris. Je leur adresse à tous mes remerciements sincères. Je remercie plus particulièrement deux amies précieuses, Elena Hoyau et Amélie Bret. Nous avons parcouru ce chemin ensemble, et nous voilà arrivées au bout. Elena, merci pour ta grande gentillesse et ton sens de l'organisation à tout épreuve qui a eu raison de bien des tracasseries. Amélie, merci pour ta bienveillance et ton empathie, qui font de toi un modèle de pro-socialité. J'ai été ravie de passer ces années avec vous et suis impatiente de voir ce que les suivantes nous réservent !

Enfin, mes derniers remerciements vont à ma famille (félins compris) pour leur affection et leur soutien sans faille qui ont été d'un grand réconfort. Plus particulièrement, je remercie mon père, Daniel Meyer, dont j'admire depuis toujours la réflexion originale et nuancée. Certes, plus de 15 ans ont passé depuis l'époque où il m'expliquait le fonctionnement d'une

centrale nucléaire en dessinant sur des serviettes en papier à la fin du repas, mais il reste un modèle que je m'applique à suivre.

Mon cher P.A, ce travail te doit beaucoup, c'est donc à toi que je le dédie. Merci pour tout.

# Contributions

Le travail décrit dans cette thèse a été réalisé en étroite collaboration avec les différents membres du projet Fluence. Pour ne pas que l'on m'attribue le crédit de ce qui a été réalisé par d'autres, la contribution de chacun est présentée ici.

Sylviane Valdois, en plus d'être ma directrice de thèse, est la responsable scientifique du projet Fluence. C'est elle qui a conçu et choisi les différentes évaluations pré et post-entraînements. Elle a soumis notre protocole au Comité d'éthique en recherche non interventionnelles.

Sonia Mandin, cheffe du projet Fluence, a assuré la liaison entre nos équipes de recherche et les enseignants participants au projet. En interaction avec Sylviane Valdois, elle a organisé les formations des enseignants dans les différentes académies. Elle a aussi saisi les données collectées lors des pré et post-tests et encadré la réalisation de l'interface enseignant.

Julien Diard, mon co-directeur de thèse, a conçu l'algorithme d'adaptation de la difficulté Parseval et Thierry Phénix, post-doctorant sur le projet, a développé la librairie C# utilisée par Evasion.

Tout au long du développement d'Evasion, Sylviane Valdois, Julien Diard, Sonia Mandin et moi-même avons interagi en continu pour valider collectivement le développement des différentes propriétés du logiciel.

Le studio de jeux vidéo Xiwen Studio a développé le jeu Evasion sur la base de nos spécifications. Si la nature des tâches utilisées est de notre fait, l'univers graphique, les éléments de gameplay et le poster accompagnant Evasion ont été pensé et réalisé par leurs soins.

Matthieu Rolland, statisticien sur le projet Fluence, a séparé les classes du projet en deux groupes expérimentaux équivalents. Il a pré-traité les données obtenues lors des évaluations pré et post entraînements et a mené les analyses comparant les performances en lecture des deux groupes de notre expérience. Alexandre Seillet, aussi statisticien, a réalisé les analyses d'auto-corrélation de mes modèles multi-niveaux.

L'équipe du LIDILEM, composée de Matthieu Loiseau, Marie-Pierre Jouannaud et Coralie Payre-Ficout, a conçu le jeu contrôle Luciole, qui a été développé par la société Oeil pour Oeil.

# Table des matières

<b>Table des matières</b>	<b>vi</b>
<b>Table des figures</b>	<b>viii</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>xi</b>
<b>1 Introduction – Le laboratoire au service de l'école</b>	<b>1</b>
<b>I État de l'art</b>	<b>9</b>
<b>2 La place de l'attention visuelle dans la lecture et son apprentissage</b>	<b>11</b>
2.1 Identifier les mécanismes attentionnels impliqués en lecture . . . . .	11
2.2 Liens entre l'empan visuo-attentionnel et l'apprentissage la lecture . . . . .	17
<b>3 Description mathématique de l'attention visuelle</b>	<b>25</b>
3.1 Effets généraux de l'attention visuelle sur le traitement perceptif . . . . .	25
3.2 Modèle visuo-attentionnel dans le cas 1D . . . . .	26
3.3 Généralisation à l'espace 2D : un modèle conceptuel de l'attention . . . . .	29
<b>4 Le jeu vidéo d'action : un candidat idéal pour entraîner les dimensions de l'attention visuelle impliquées en lecture</b>	<b>39</b>
4.1 Les jeux vidéo d'action comme objet d'étude scientifique . . . . .	39
4.2 Effet des jeux vidéo d'action sur les ressources attentionnelles . . . . .	43
4.3 L'effet de la pratique des jeux vidéo d'action sur les performances en lecture : conséquence de meilleures capacités attentionnelles? . . . . .	48
<b>II Conception du logiciel Evasion</b>	<b>55</b>
<b>5 Evasion, présentation d'un jeu vidéo d'action éducatif</b>	<b>57</b>
5.1 Support utilisé . . . . .	57
5.2 Choix des tâches . . . . .	58
5.3 Présentation de notre espace de difficulté . . . . .	66
5.4 Choix des stimuli . . . . .	68
<b>6 Parseval, un algorithme d'adaptation de la difficulté inspiré de la psychométrie adaptative</b>	<b>73</b>
6.1 État de l'art . . . . .	73
6.2 Présentation de Parseval . . . . .	79
6.3 Objectifs expérimentaux et protocole . . . . .	81

<b>III</b>	<b>Évaluation et ajustement</b>	<b>83</b>
<b>7</b>	<b>Évaluation d’Evasion en conditions réelles : Résultats</b>	<b>85</b>
7.1	Méthodologie expérimentale . . . . .	85
7.2	Résultats . . . . .	93
<b>8</b>	<b>Évaluation d’Evasion en conditions réelles : Synthèse et discussion des résultats</b>	<b>117</b>
8.1	Un entraînement qui ne mobilise pas suffisamment l’empan visuo-attentionnel ? . . .	117
8.2	Fonctionnement de Parseval . . . . .	122
8.3	Un protocole qui ne répond pas aux besoins du terrain ? . . . . .	123
<b>9</b>	<b>Conclusion – Ajustements et perspectives</b>	<b>129</b>
9.1	Résumé . . . . .	129
9.2	Proposition d’ajustements à envisager pour de futures expérimentations . . . . .	131
9.3	Vers des expérimentations écologiques standardisées soutenues par des instances dédiées . . . . .	136
	<b>Bibliographie</b>	<b>141</b>
<b>A</b>	<b>Matrice de confusion générées pour les lettres romaines minuscules et majuscules</b>	<b>159</b>
<b>B</b>	<b>Règles et exemple de génération des distracteurs en fonction du cran de difficulté sélectionné pour un stimulus-cible</b>	<b>161</b>
<b>C</b>	<b>Tableau des simuli-cible et distracteurs utilisés par Evasion</b>	<b>163</b>
<b>D</b>	<b>Tests utilisés lors des évaluations pré et post-entraînement</b>	<b>169</b>
<b>E</b>	<b>Coefficients des modèles multi-niveaux utilisés pour analyser les données d’entraînement d’Evasion</b>	<b>171</b>
<b>F</b>	<b>Taux de réussite moyen et nombre d’événements observés calculés pour chaque région des espaces de difficulté associés à la Forêt en T, à la Tour des Mots et à l’Omelette</b>	<b>175</b>

# Table des figures

1.1	Illustration des différents types d'expérimentation permettant de passer de connaissances produites en laboratoire à un outil pédagogique dont l'utilisation en classe a un impact prouvé. . . . .	3
1.2	Illustration des deux volets du projet Fluence sur les années 2018–2020. . . . .	5
2.1	Proposition de synthèse du processus d'analyse visuelle des mots et de leurs unités en fonction de leur taille . . . . .	13
2.2	Illustration des tâches de report partiel et global utilisées notamment par Bosse, Tainturier, et Valdois (2007). . . . .	16
2.3	Nombre de lettres correctement identifiées en tâche de report global en fonction de la position des lettres dans la chaîne chez des personnes parlant l'espagnol, le français ou l'arabe . . . . .	16
2.4	Illustration de la théorie de l'auto-apprentissage par décodage phonologique (Share, 1995). . . . .	18
2.5	Structure générale du modèle MTM et illustration de la distribution de l'attention visuelle sur le mot CHAT . . . . .	19
2.6	Exemple de tâche d'identification, de comparaison de séquence, de recherche visuelle et de catégorisation avec des stimuli verbaux. . . . .	21
3.1	Représentation schématique du modèle BRAID et illustration du résultat du traitement simulé au fur et à mesure des itérations . . . . .	27
3.2	Valeurs de $\sigma$ et de $Qa$ en fonction des performances cumulées en tâche de report partiel et global . . . . .	28
3.3	Illustrations de distributions gaussiennes en fonction de leurs paramètres $\mu$ et $\sigma$ , et leur possible déploiement sur une scène visuelle . . . . .	32
3.4	Illustration du contrôle de la distribution attentionnelle . . . . .	33
3.5	Illustration d'une hiérarchie de différents niveaux de représentations visuelles. . . . .	35
4.1	Évolution du nombre de publications scientifiques avec les mots clefs « action video game », de 1980 à nos jours . . . . .	40
4.2	Quatre exemples de jeux vidéo d'action . . . . .	41
4.3	Illustration de certains protocoles utilisés pour comparer joueurs de jeux vidéo d'action et non-joueurs. . . . .	44
4.4	Illustration au cas 1D de l'équivalence mathématique entre augmentation de la quantité de ressources attentionnelles et répartition plus étendues des ressources dans l'espace . . . . .	46
4.5	Emplacement moyen auquel la cible lumineuse a été détectée pour l'œil gauche et l'œil droit . . . . .	47
4.6	Performances aux tâches de lecture avant et après entraînement au jeux vidéo d'action . . . . .	48
4.7	Performances aux tâches d'attention visuelle des participants avant et après entraînement aux jeux vidéo d'action . . . . .	49
4.8	Proportion de réussite pour chaque position de la chaîne de lettres en tâche de report global et en tâche de report partiel . . . . .	52

5.1	Images tirées de l'Attrape-Lettre . . . . .	61
5.2	Images tirées de la Forêt en T . . . . .	62
5.3	Images tirées de la Tour des Lettres . . . . .	63
5.4	Images tirées de l'Omelette . . . . .	65
6.1	Déroulement de l'algorithme de Sampayo-Vargas et collaborateurs . . . . .	74
6.2	Illustration des principales théories sur l'impact de la difficulté sur l'apprentissage. . . . .	76
6.3	Forme mathématique et illustration d'une courbe psychométrique 2D . . . . .	77
6.4	Représentation visuelle d'un espace de difficulté tridimensionnel utilisable par Parseval . . . . .	80
7.1	Nuages de points projetés dans le plan factoriel de l'analyse en composantes principales menée sur les pré-tests des groupes Evasion et Luciole . . . . .	88
7.2	Illustration du biais d'agrégation lorsque la régression est effectuée sur des données non indépendantes . . . . .	92
7.3	Estimation des ordonnées à l'origine et des pentes des régressions linéaires réalisées pour chaque classe . . . . .	94
7.4	Évolution des taux de performances en tâche de report partiel et global pour les élèves ayant joué à Luciole et ceux ayant joué à Evasion . . . . .	94
7.5	Prédiction des scores d'empan visuo attentionnel par le modèle 0 par rapport aux observations réelles . . . . .	95
7.6	Modélisation de l'évolution de l'empan visuo-attentionnel avant et après entraînement pour les classes ayant joué à Evasion et celles ayant joué à Luciole . . . . .	95
7.7	Graphe des performances en lecture de texte et de pseudo-mots des élèves ayant joué à Evasion et à Luciole . . . . .	96
7.8	Histogramme des temps d'entraînement par classe pour Evasion. . . . .	97
7.9	Histogramme des durées quotidiennes d'entraînement par classe pour Evasion. . . . .	97
7.10	Évolution des durées quotidiennes d'entraînement au cours du protocole . . . . .	98
7.11	Classification des classes en fonction des 3 critères de bon suivi de protocole . . . . .	99
7.12	Histogramme de la semaine de démotivation perçue par les enseignants . . . . .	100
7.13	Histogrammes des appréciations des enseignants pour les quatre mini-jeux d'Evasion . . . . .	100
7.14	Affichage du test de comparaison multiple des rangs moyens des appréciations des 4 mini-jeux . . . . .	101
7.15	Diagramme en violon des temps de jeu passés sur chaque mini-jeu . . . . .	101
7.16	Évolution de la différence de score d'empan visuo-attentionnel en fonction du temps total d'entraînement . . . . .	102
7.17	Évolution de la différence de score d'empan en fonction du temps passé sur l'Attrape-Lettre	102
7.18	Répartition des élèves dans l'espace tridimensionnel des proportions des temps passés sur chaque mini-jeu . . . . .	103
7.19	Évolution du taux de réussite moyen au cours du temps pour les quatre mini-jeux d'Evasion	105
7.20	Taux de réussite moyen calculé pour chaque case de l'espace de difficulté associé à l'Attrape-Lettre . . . . .	106
7.21	Nombre de configuration proposées pour chaque région de l'espace de difficulté associé à l'Attrape-Lettre . . . . .	106
7.22	Taux de réussite moyen calculé pour chaque case de l'espace de difficulté associé à l'Attrape-Lettre pour les élèves dont le taux de réussite est compris entre 0.7 et 0.8 . . . . .	107
7.23	Évolution du taux de réussite individuel au fur et à mesure des événements pour les quatre mini-jeux d'Evasion . . . . .	108
7.24	Regroupement des élèves en fonction de la moyenne et de l'écart type de leur taux de réussite illustré ici sur l'Attrape-Lettre . . . . .	108
7.25	Évolution du niveau estimé $K$ moyen en fonction du temps pour les quatre mini-jeux d'Evasion . . . . .	110

---

7.26	Évolution de la différence de score d'empan en fonction de l'évolution du niveau estimé K dans l'Omelette. . . . .	111
7.27	Graphe des résidus studentisés (à gauche), graphe d'autocorrélation (au centre) et d'autocorrélation partielle (à droite) pour le modèle T. . . . .	113
7.28	Graphe des résidus studentisés (à gauche), graphe d'autocorrélation (au centre) et d'autocorrélation partielle (à droite) pour le modèle K. . . . .	113
7.29	Graphe des résidus studentisés (à gauche), graphe d'autocorrélation (au centre) et d'autocorrélation partielle (à droite) pour le modèle obtenu par sélection automatique de variables. . . . .	114
7.30	Diagramme quantile-quantile des résidus du modèle obtenu par sélection automatique de variable . . . . .	115
F.1	Taux de réussite moyen calculé pour chaque case de l'espace de difficulté associé à la Forêt en T. En abscisse, s la longueur des séquences, en ordonnée, la similarité visuelle cible/distracteur, et les sous-graphes 1 à 6 correspondent aux 6 valeurs liées au nombre et à la cadence de déplacement des fantômes. . . . .	175
F.2	Taux de réussite moyen calculé pour chaque case de l'espace de difficulté associé à la Tour des Lettres. En abscisse, la longueur des séquences, en ordonnée, la similarité visuelle cible/distracteur, et les sous-graphes 1 à 6 correspondent aux 6 valeurs liées aux nombre de portes présentes à chaque étage. . . . .	176
F.3	Taux de réussite moyen calculé pour chaque case de l'espace de difficulté associé à l'Omelette. En abscisse, la longueur des séquences, en ordonnée, la similarité visuelle cible/distracteur, et les sous-graphes 1 à 6 correspondent aux 6 valeurs liées au nombre d'œufs en mouvement dans le décor. . . . .	176
F.4	Nombre de configuration proposées pour chaque région de l'espace de difficulté associé à la Forêt en T. Les axes sont les mêmes que ceux de la Figure F.1. . . . .	176
F.5	Nombre de configuration proposées pour chaque région de l'espace de difficulté associé à la Tour des Lettres. Les axes sont les mêmes que ceux de la Figure F.2. . . . .	177
F.6	Nombre de configuration proposées pour chaque région de l'espace de difficulté associé à l'Omelette. Les axes sont les mêmes que ceux de la Figure F.3. . . . .	177

# Liste des tableaux

3.1	Modèle conceptuel de l'attention visuelle. . . . .	30
5.1	Lettres de l'alphabet ordonnées par similarité croissante avec la lettre D . . . . .	70
7.1	Coordonnées des centroïdes des groupes associés aux régimes de jeu calculés dans l'espace 4D des temps de jeu relatifs . . . . .	103
A.1	Matrice de confusion des lettres minuscules . . . . .	159
B.1	Règles et exemple de génération des distracteurs en fonction du cran de difficulté sélectionné pour un stimulus-cible de longueur 2 . . . . .	161
B.2	Règles et exemple de génération des distracteurs en fonction du cran de difficulté sélectionné pour un stimulus-cible de longueur 3 de type CCV . . . . .	161
B.3	Règles et exemple de génération des distracteurs en fonction du cran de difficulté sélectionné pour un stimulus-cible de longueur 3 qui ne sont pas de type CCV . . . . .	162
B.4	Règles et exemple de génération des distracteurs en fonction du cran de difficulté sélectionné pour un stimulus-cible de longueur 4 . . . . .	162
C.1	Tableau des stimuli-cible majuscules de longueur 4 et de leur distracteurs associés . . .	163
C.2	Tableau des stimuli-cible majuscules de longueur 3 et de leur distracteurs associés . . .	164
C.3	Tableau des stimuli-cible majuscules de longueur 2 et de leur distracteurs associés . . .	165
C.4	Tableau des stimuli-cible minuscules de longueur 4 et de leur distracteurs associés . . .	166
C.5	Tableau des stimuli-cible minuscules de longueur 3 et de leur distracteurs associés . . .	167
C.6	Tableau des stimuli-cible minuscules de longueur 2 et de leur distracteurs associés . . .	168
D.1	Tests utilisés lors des évaluations pré et post-entraînements en passation collective. . . .	169
D.2	Tests utilisés lors des évaluations pré et post-entraînements en passation individuelle. .	170
E.1	Coefficients du modèle 0 expliquant la variabilité du score d'empan visuo-attentionnel par la temporalité du test et le jeu utilisé à l'entraînement. . . . .	171
E.2	Coefficients du modèle Pr expliquant la variabilité du score d'empan visuo-attentionnel par la temporalité du test et la qualité du suivi du protocole. . . . .	171
E.3	Coefficients du modèle M expliquant la variabilité du score d'empan visuo-attentionnel par la temporalité du test et la semaine de démotivation perçue des élèves. . . . .	171
E.4	Coefficients du modèle T expliquant la variabilité du score d'empan visuo-attentionnel par la temporalité du test et la durée totale d'entraînement. . . . .	172
E.5	Coefficients du modèle T1 expliquant la variabilité du score d'empan visuo-attentionnel par la temporalité du test et le temps passé sur chacun des mini-jeux d'Evasion (t1 : durée passée sur l'Attrape-Lettre, t2 : durée passée sur la Forêt en T, t3 : durée passée sur la Tour des Lettres, t4 : durée passée sur l'Omelette. . . . .	172
E.6	Coefficients estimés du modèle Reg expliquant la variabilité du score d'empan visuo-attentionnel par la temporalité du test et les régimes d'entraînement. . . . .	172

E.7	Coefficients estimés du modèle Reg + expliquant la variabilité du score d'empan visuo-attentionnel par la temporalité du test, les régimes d'entraînement et la durée totale d'entraînement. . . . .	172
E.8	Coefficients estimés des modèles J1 (respectivement J2, J3 et J4) expliquant l'évolution du niveau estimé K par l'avancement de l'entraînement au sein de l'Attrape-Lettre (respectivement, de la Forêt en T, de la Tour des Lettres et de l'Omelette) . . . . .	173
E.9	Coefficients estimés des modèles K1 (respectivement K2, K3 et K4) expliquant l'évolution du niveau K estimé par le profil du taux de réussite au sein de l'Attrape-Lettre (respectivement, de la Forêt en T, de la Tour des Lettres et de l'Omelette). . . . .	173
E.10	Coefficients estimés du modèle K expliquant la variabilité du score d'empan visuo-attentionnel par l'évolution du niveau K estimé au sein de chaque mini-jeu (k1 : l'Attrape-Lettre, k2 : Forêt en T, k3 : la Tour des Lettres, k4 : l'Omelette). . . . .	174
E.11	Coefficients estimés du modèle expliquant la variabilité du score d'empan visuo-attentionnel par des variables sélectionnées automatiquement. . . . .	174

# Chapitre 1

## Introduction – Le laboratoire au service de l'école

“Un processus dans lequel toute la société est engagé met en jeu bien plus que de simples apprentissages scolaires.”

(PROST, 1979)

### Bref état des lieux des performances en lecture après et pendant la scolarité

L'enjeu premier de l'école est, depuis les Cinq mémoires de l'Instruction Publique (Condorcet, 1791) de former des citoyens dont les disparités d'instruction sont suffisamment réduites pour empêcher la domination des plus éduqués sur les autres. L'action publique avait alors pour mission de leur assurer une égalité d'accès à la loi et à la gestion de leurs biens, garanties respectivement par la maîtrise de la lecture et des mathématiques.

Presque deux siècles et demi ont passé, et l'emphase sur ces deux compétences – devenues depuis les « fondamentaux » – reste une priorité de l'Éducation Nationale. Aujourd'hui, plus de 12 millions d'élèves s'asseyent chaque jour sur les bancs de l'école (MENESR, 2017). Au cours des 10 années, maintenant 13, de scolarité obligatoire, ils y passeront environ 8 000 h, et tel est le cas pour tous les élèves scolarisés après 1959 (ordonnance n°59-45 du 6 janvier 1959).

Pourtant, malgré ce temps d'instruction considérable et les moyens publics qui y sont alloués, la bataille de l'alphabétisation est loin d'être gagnée. 23% des jeunes français ayant participé à la Journée d'Appel de Préparation à la Défense en 2017 ont des capacités de lecture jugées non fonctionnelles selon des critères liés à l'automatisation de la lecture, à la compréhension de texte et à la connaissance du vocabulaire (Chabanon, Rivière, De la Haye, & Gombert, 2017). Ce constat est le même quelle que soit l'année de scolarisation concernée :

- 21% des élèves de 15 ans sont « peu performants » en compréhension de l'écrit (OCDE, 2016) ;
- 15% des élèves en fin de collège ne savent pas « prélever une information explicite lorsque celle-ci est facilement accessible et repérable » (Dalibard, Fumel, & Lima, 2016) ;
- 39% des élèves à la fin de l'école primaire sont incapables d'identifier le sujet principal d'un texte (Andreu, Dalibard, & Etève, 2016).

Or, les compétences en lecture prédisent la réussite d'autres matières scolaires (Nunes et al., 2017), ce qui fait de cette compétence un pré-requis essentiel à l'éducation et le

creusement actuel des inégalités entre les meilleurs et les moins bons lecteurs renforce la gravité de ce constat (Bianco, 2016).

Les chiffres présentés ici sont bien connus et largement utilisés pour justifier bon nombre de projets politiques. Malgré la disparité idéologique de ces derniers, tous s'accordent sur un point : dans une société digitalisée où l'écrit occupe une place importante, ces élèves sont condamnés à devenir des adultes socialement vulnérables. 17% des élèves sortent d'ailleurs du système de formation français avec au plus le brevet des collèges (Le Rhun, 2013), ce qui les place dans des situations professionnelles précaires. Ces jeunes comptent probablement dans leurs rangs bon nombre de faibles lecteurs.

Des lacunes présentes dès la classe de CP peuvent expliquer ces faibles performances en compréhension de texte. Bien qu'il faille attendre leur publication définitive en janvier 2019 (indisponibles à l'heure où nous écrivons), les premiers résultats des évaluations menées par le Conseil Scientifique de l'Éducation Nationale et la Direction de l'évaluation, de la prospective et de la performance semblent aller dans ce sens : un communiqué du ministère indique que 23% des élèves de CP ont des difficultés à associer une lettre au son qu'elle produit et que 30% des élèves de CE1 ont une vitesse de lecture de texte inférieure à 30 mots par minutes. Ces résultats sont équivalents à ceux du National Reading Panel mené aux États-Unis (Ehri et al., 2001 ; National Institute of Child Health and Human Development, 2000).

Bien sûr, l'école n'est pas toute puissante. La situation économique et sociale dans laquelle sont certains élèves explique en partie ce constat. Pour autant, cela ne doit pas conduire à l'immobilisme : l'Éducation Nationale peut trouver de nouvelles réponses aux besoins de ces élèves, et celles-ci peuvent prendre leurs racines dans la recherche scientifique. Des interventions précoces et ciblées, soutenues par des outils dont l'impact sur les compétences en lecture a été vérifié, pourraient accroître la part d'élèves bon lecteurs en fin de scolarité.

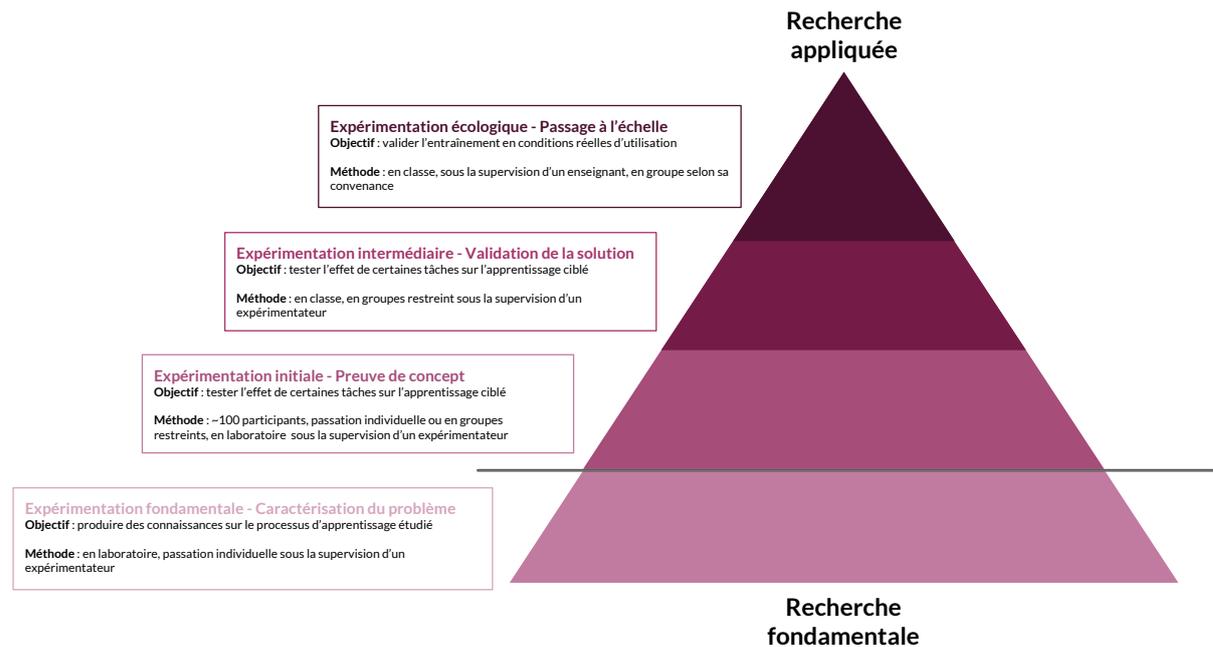
## Des pratiques pédagogiques fondées sur les preuves

Les interventions pédagogiques ne font sens qu'au regard du contexte dans lequel elles ont lieu. Malgré la liberté pédagogique dont ils bénéficient, les enseignants français évoluent dans un cadre particulièrement ambivalent. Si des programmes nationaux très détaillés spécifient le contenu de leurs cours, rares sont les ressources qui leur présentent des méthodes pédagogiques fondées sur les preuves. Plus grave, il est courant de trouver dans les plans de formation continue des enseignants des modules sur des méthodes dont l'absence d'efficacité a été prouvée. C'est notamment le cas des formations aux « styles d'apprentissages » qui sont parfois encore proposés dans certaines académies alors que la théorie<sup>1</sup> sur laquelle elles reposent ne sont pas confirmées par l'expérience (Pashler, McDaniel, Rohrer, & Bjork, 2009). Ce manque de ressources de qualité induit une forte prévalence des « neuro-mythes » sur l'apprentissage au sein des communautés enseignantes (Dekker, Lee, Howard-Jones, & Jolles, 2017), ce qui limite la diffusion des pratiques pédagogiques efficaces.

Notre propos n'est pas de disqualifier l'expertise des enseignants, reproche que l'on adresse souvent aux chercheurs qui défendent les pratiques fondées sur les preuves (voir par exemple Jarraud, 2018, pour le Café Pédagogique). Au contraire, nous pensons qu'il leur faut les moyens de choisir parmi un ensemble de savoirs et d'outils dont l'efficacité a été prouvée, lesquels conviennent le mieux à la configuration de leur classe.

---

1. Dans la théorie des styles d'apprentissage, chaque enfant aurait un canal sensoriel de prédilection qu'il faudrait cibler pour améliorer l'apprentissage.



**FIGURE 1.1** – *Illustration des différents types d'expérimentation permettant de passer de connaissances produites en laboratoire à un outil pédagogique dont l'utilisation en classe a un impact prouvé.*

Pour ce faire, deux leviers sont à notre disposition. Tout d'abord, il convient de diffuser plus largement les connaissances déjà produites sur les pratiques pédagogiques efficaces. A l'heure actuelle, il existe des ressources élaborées au sein de communautés informelles (voir par exemple le groupe Facebook intitulé « Evidence Based Education France – Progrès éducatif et démarche scientifique »<sup>2</sup>) ou par des blogs tenus par des chercheurs (voir par exemple « Ramus méninges »<sup>3</sup>) ou des enseignants (voir par exemple « Par temps clair »<sup>4</sup>), mais leur diffusion est moindre comparée à une démarche institutionnelle menée au sein de l'Éducation Nationale.

Le deuxième levier repose sur la conduite plus systématique de recherches dites « écologiques ». Ces expérimentations ont pour objectif de tester directement en classe l'impact d'un dispositif pédagogique en particulier et impliquent plusieurs dizaines, si ce n'est plusieurs centaines d'écoles. Elles sont la dernière étape d'une longue transition du laboratoire à la classe (voir Figure 1.1), qui part des recherches fondamentales menées pour caractériser un problème en particulier (par exemple, identifier les dimensions cognitives impliquées dans tel ou tel apprentissage), puis passe par le test en laboratoire d'un premier programme d'entraînement (des dimensions cognitives identifiées au préalable, ou de l'apprentissage lui-même). L'évaluation de cet entraînement permet si besoin de le corriger et apporte un nouvel éclairage sur les résultats des recherches fondamentales. Une fois ces étapes franchies, des programmes d'entraînement plus élaborés peuvent être évalués en classe, d'abord sur des échantillons relativement restreints qui s'entraînent sous la supervision d'un expérimentateur, puis à grande échelle lors d'expérimentations écologiques.

La réalisation d'expérimentations écologiques permet de voir si les résultats ainsi obtenus

2. <https://www.facebook.com/groups/681409111979887/>

3. <http://www.scilogs.fr/ramus-meninges/>

4. <http://par-temps-clair.blogspot.com/>

résistent à l'environnement complexe de la classe, et quels sont les contextes qui conditionnent leur succès. Les connaissances qu'elles produisent sont l'aboutissement de tous les travaux réalisés auparavant. C'est dans cette démarche d'expérimentation écologique que s'inscrit ce travail de thèse.

## Présentation des travaux réalisés

### Objectif et périmètre considéré

Aujourd'hui, les précurseurs de la lecture les plus entraînés à l'école sont les compétences phonologiques, c'est-à-dire la capacité à analyser, reconnaître et manipuler les sons de sa langue. Les programmes scolaires français accordent une large place à leur entraînement, proposant aux enseignants de recourir à divers types d'exercices comme les tâches de rime ou de comptage syllabique en maternelle et d'entraîner spécifiquement l'identification et la manipulation des phonèmes (les plus petites unités de son qui différencient les mots de la langue) en maternelle<sup>5</sup> et en début de primaire<sup>6</sup>. Dans la mesure où le lien entre les capacités de traitement phonologique et l'apprentissage de la lecture est largement démontré (Caravolas et al., 2013 ; Melby-Lervåg, Lyster, et Hulme, 2012), on ne peut que se féliciter de ces recommandations.

Cependant, plusieurs éléments suggèrent que ce n'est pas suffisant. En effet, ces entraînements améliorent principalement le décodage mais contribuent peu à l'automatisation de la lecture (Ehri et al., 2001). Par ailleurs, plusieurs études montrent que les compétences en décodage ont augmenté entre 1999 et 2013, mais que les élèves de 2013 n'ont pas un meilleur niveau en lecture que ceux de 1999. Il est donc nécessaires de proposer d'autres entraînements, qui ciblent par exemple la fluence en lecture (c'est-à-dire, une lecture rapide et sans erreurs), dont on sait qu'elle prédit le niveau en compréhension de textes et en orthographe (Kim, Wagner, & Lopez, 2012 ; Lai, Benjamin, Schwanenflugel, & Kuhn, 2014 ; Little & Hart, 2016).

Pour ce faire, deux stratégies d'entraînement peuvent être mises en place : soit entraîner directement le mécanisme ciblé, en proposant aux élèves de lire plus régulièrement et avec plus ou moins d'assistance, soit entraîner les dimensions cognitives sous-jacentes au processus de lecture, et notamment celles dont on peut penser quelles sont le plus en lien avec la vitesse de lecture. Notre travail relèvera de cette seconde démarche. Nous nous intéresserons plus particulièrement aux dimensions de l'attention visuelle impliquées en lecture, auxquelles les programmes scolaires n'accordent pour l'instant aucune place. Or, celles-ci sont particulièrement prédictives de la vitesse de lecture (Bosse & Valdois, 2009 ; Lobier, Dubois, & Valdois, 2013). Elles sont également liées à la compréhension de texte et au niveau de connaissances lexicales orthographiques (Awadh et al., 2016 ; Bosse, Chaves, Largy, & Valdois, 2015). Des études longitudinales récentes montrent que l'attention visuelle mesurée en grande section de maternelle prédit le niveau ultérieur de lecture, notamment la vitesse de lecture (Franceschini, Gori, Ruffino, Pedrolli, & Facoetti, 2012).

Notre objectif est donc d'améliorer les performances en lecture des élèves de CP grâce à un entraînement dédié ciblant les dimensions attentionnelles impliquées en lecture. Cet entraînement prendra la forme d'une application éducative sur tablette, le format numérique

---

5. <http://eduscol.education.fr/cid91996/mobiliser-le-langage-dans-toutes-ses-dimensions.html>

6. [http://www.education.gouv.fr/pid285/bulletin\\_officiel.html?cid\\_bo=94753](http://www.education.gouv.fr/pid285/bulletin_officiel.html?cid_bo=94753)

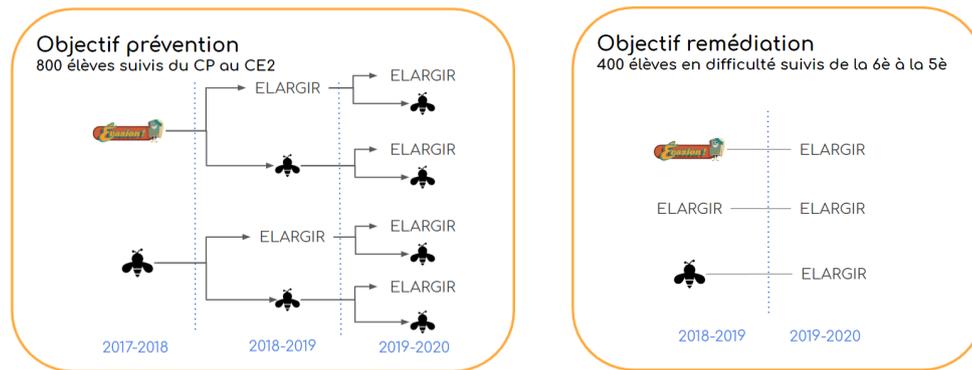


FIGURE 1.2 – Illustration des deux volets du projet Fluence sur les années 2018–2020.

ayant dans notre cas plusieurs avantages. Il nous permet tout d'abord de proposer des éléments visuels dynamiques, dont on peut faire varier finement le nombre et les propriétés, ce qui n'est pas possible sur format papier. Grâce à un algorithme d'adaptation de la difficulté, les caractéristiques de l'entraînement pourront être ajustées au niveau de l'élève. Ainsi, un entraînement unique pourra être utilisé par tous les élèves de la classe, quelles que soient leurs performances à la tâche.

## Contexte – Le projet Fluence

Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans le cadre du projet Fluence. Financé par la Caisse des Dépôts et Consignation (CDC) dans le cadre de l'appel à projet e-Fran (PIA 2) « des territoires éducatifs d'innovation numérique », ce projet qui réunit le Laboratoire de Psychologie et de NeuroCognition (LPNC, UMR 5105), le Gipsa-Lab (UMR 5216) et le Laboratoire de Linguistique et Didactique des Langues Etrangères et Maternelles (LIDILEM, EA 609 de l'Université Grenoble Alpes (UGA)) a pour objectif de développer et d'évaluer l'impact des logiciels éducatifs conçus pour améliorer la fluence en lecture. Ce projet est d'une durée de quatre ans (2017–2020), pendant lesquels trois logiciels éducatifs basés sur les données de la recherche internationale ont été développés :

- le logiciel Evasion, développé par le LPNC, dont l'objectif est d'entraîner les dimensions de l'attention visuelle impliquées en lecture pour améliorer les performances en lecture,
- le logiciel ELARGIR, développé par le Gipsa-lab, qui est un dispositif de lecture répétée et assistée de textes mettant en valeur des unités de plus en plus longues,
- le logiciel LUCIOLE, développé par le LIDILEM et qui est un entraînement contrôle améliorant l'apprentissage de l'anglais oral.

L'évaluation des dispositifs du projet Fluence fait l'objet d'une expérimentation longitudinale qui comprend deux volets : un volet de prévention des difficultés en lecture auprès d'élèves de CP tout-venants qui durera 3 ans et un volet de remédiation auprès d'élèves de 6ème ayant des difficultés avérées qui durera 2 ans (voir Figure 1.2). Ces expérimentations ont été mises en place avec le soutien du Rectorat de l'académie de Grenoble.

## Contribution – Détail des réalisations

Pendant ce projet de thèse, nous avons :

- réalisé un état de l'art de la littérature sur les dimensions de l'attention visuelle impliquées en lecture, que nous avons synthétisé par un formalisme mathématique que nous avons défini ;
- utilisé les conclusions de cet état de l'art pour concevoir le logiciel Evasion, avec pour objectif d'entraîner l'attention visuelle et avoir par conséquent un effet positif sur les performances en lecture ;
- évalué l'impact d'Evasion en mesurant les performances visuo-attentionnelles et en lecture de plusieurs centaines d'enfants de CP avant et après entraînement sur le logiciel.

Ces trois points constituent respectivement les trois parties de ce présent manuscrit, que nous allons maintenant introduire.

## Etat de l'art

Le **Chapitre 2** passe en revue les éléments qui suggèrent que l'attention visuelle est nécessaire au processus de lecture. Nous expliciterons quelles sont précisément les dimensions de l'attention visuelle impliquées en lecture, grâce à des données comportementales obtenues chez le lecteur expert ou apprenti, le lecteur tout-venant ou dyslexique, et les interpréterons dans le cadre de modèles computationnels. Enfin, nous présenterons plus en détail les entraînements existants et leur impact sur les performances en lecture.

Le **Chapitre 3** fait le lien entre notre analyse des dimensions de l'attention visuelle impliquées en lecture et la littérature sur l'attention visuelle en général. Nous avons pour cela proposé un formalisme mathématique des différents mécanismes de l'attention visuelle, inspiré du modèle computationnel BRAID, grâce auquel nous préciserons l'objectif de notre entraînement.

Le **Chapitre 4** concerne les jeux vidéo d'action, dont l'effet sur les performances en lecture est suggéré par deux études préliminaires de la littérature. Nous proposons une synthèse des études sur l'effet de la pratique des jeux vidéo d'action sur l'attention visuelle, qui seront interprétés grâce au formalisme mathématique défini au Chapitre 3. Nous pourrions ainsi caractériser les liens entre les dimensions de l'attention visuelle impliquées en lecture et celles entraînées par les jeux vidéo d'action.

## Conception du logiciel Evasion

Le **Chapitre 5** présente Evasion, le logiciel d'entraînement que nous avons conçu dans ce travail de thèse à partir des éléments issus des chapitres précédents. Nous détaillerons les choix qui ont guidé sa conception, les tâches qu'il inclut, les stimuli qu'il propose, et ses paramètres de difficulté.

Le **Chapitre 6** traite des algorithmes d'adaptation de la difficulté pour les logiciels éducatifs. Nous présenterons les études qui suggèrent qu'adapter la difficulté d'un entraînement aux performances d'un participant améliore l'amplitude des changements induits par cet entraînement, puis passerons en revue différents algorithmes. Nous présenterons enfin Parseval, l'algorithme d'adaptation de la difficulté que nous avons inclus dans Evasion.

## Evaluation et ajustements

Le **Chapitre 7** présente le déroulement et les résultats de l'expérience qui a été menée pour évaluer l'impact d'Evasion sur l'attention visuelle des élèves et son éventuel transfert aux performances en lecture. Nous détaillerons les analyses que nous avons faites pour tester

cet impact comparativement à celui d'un logiciel contrôle, puis celles que nous avons menées pour obtenir des informations supplémentaires sur notre logiciel et notre protocole.

Le **Chapitre 8** discutera les résultats du Chapitre 7 au regard de la littérature. Nous explorerons plus en détail les travaux sur les entraînements des dimensions de l'attention visuelle impliquées en lecture, sur les jeux vidéo d'action et la mise en place d'expérimentations écologiques.

Le **Chapitre 9** conclut ce travail par un résumé des travaux menés et un inventaire des améliorations qui semblent nécessaires en vue d'une nouvelle évaluation d'Evasion. Nous étendrons aux perspectives scientifiques et organisationnelles qui pourront contribuer à améliorer la mise en place d'expérimentations écologiques.



Première partie

État de l'art



## Chapitre 2

# La place de l'attention visuelle dans la lecture et son apprentissage

La mobilisation des capacités attentionnelles pendant la lecture est un sujet qui a longtemps fait débat. De nombreux auteurs considèrent la lecture comme un processus uniquement linguistique. En citant, par exemple, Goswami (2015, p.43) :

« Learning to read is sometimes erroneously considered to be a visual skill, but it is actually a linguistic process. »

Si les compétences linguistiques et phonologiques sont effectivement des précurseurs de la lecture, de nombreuses études suggèrent que l'attention visuelle est mobilisée en lecture normale (Franceschini et al., 2012 ; Waechter, Besner, & Stolz, 2011) et pathologique (Hari & Renvall, 2001 ; Vidyasagar & Pammer, 2010).

Dans ce chapitre, nous passerons en revue les travaux qui mettent en évidence le rôle de l'attention visuelle dans la lecture et tentent de définir quels sont les mécanismes impliqués. Nous nous intéresserons plus particulièrement à la capacité de traitement visuel parallèle, que l'on peut estimer par la mesure de l'empan visuo-attentionnel, et détaillerons en quoi celle-ci constitue un précurseur de la lecture. Enfin, nous passerons en revue différents résultats qui suggèrent que l'entraînement de l'attention visuelle en début d'apprentissage peut améliorer les futures performances des élèves en lecture.

## 2.1 Identifier les mécanismes attentionnels impliqués en lecture

L'attention visuelle est une ressource cognitive impliquée dans le traitement des stimuli visuels en général. Bien que la plupart de la littérature lui accorde une place mineure en lecture, nous allons voir ici que l'attention visuelle est impliquée dans la lecture à plusieurs égards : dans le traitement séquentiel des mots d'un texte, et dans le traitement parallèle des lettres qui les composent.

### 2.1.1 Nécessité de l'attention visuelle pour le traitement visuel des mots

Depuis les années 1980, de nombreux modèles théoriques ont supposé que la lecture des mots se déroulait de manière automatique, sans recours à l'attention visuelle (Posner & Snyder, 1975). Pourtant, à la même époque, cette hypothèse a été remise en question

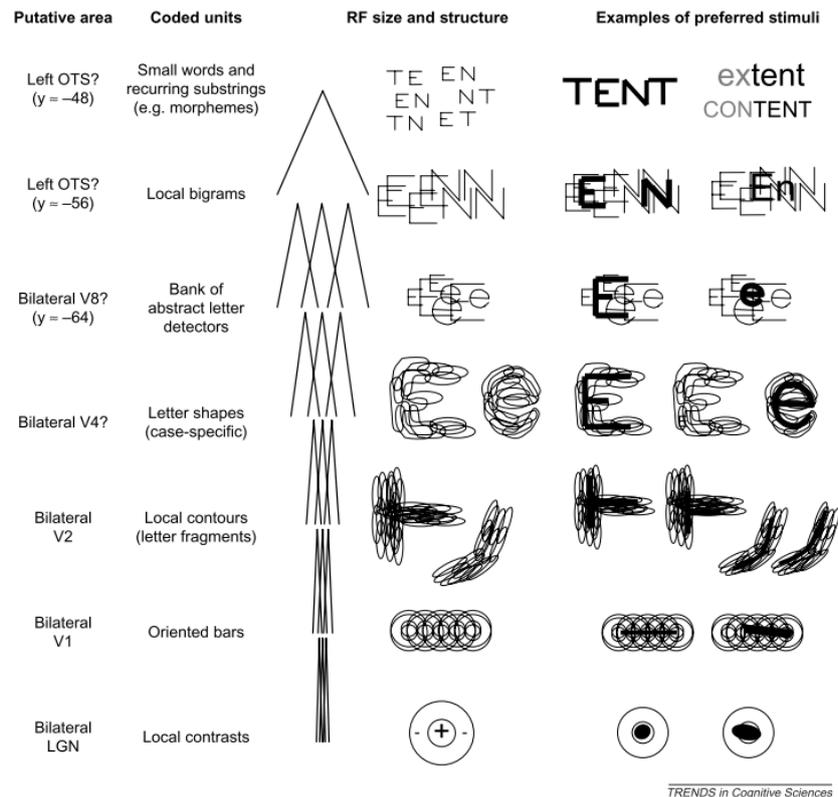
par plusieurs études suggérant que l'attention était impliquée dès les premiers stades de traitement visuel des mots. Nous allons en détailler les principaux résultats ici (pour une revue détaillée, voir Besner et al., 2016 ; Waechter et al., 2011).

L'étude qui a eu le plus large écho est celle de McCann, Folk, et Johnston (1992). Les participants ont réalisé une tâche de décision lexicale sur des mots de fréquence variable et des non-mots. L'emplacement auquel ils apparaissaient à l'écran était peu prévisible par le participant. Les expérimentateurs utilisaient un protocole dit « de Posner » : les stimuli sont précédés d'un indice apparaissant à leur futur emplacement (condition valide) ou qui apparaissait à un autre endroit (condition invalide). L'indice a pour but d'attirer l'attention des sujets vers la région du champ visuel où il était présenté. Si les chaînes de lettres sont analysées sans attention visuelle, la validité de l'indice n'aura aucun effet : quelque soit l'endroit vers lequel l'attention est orientée, le mot sera traité de la même manière. Or, il s'avère qu'en condition valide, les temps de réaction des sujets sont plus courts qu'en condition invalide, et ce, quelle que soit la fréquence des mots présentés. Cela suggère que l'attention visuelle joue bel et bien un rôle dans le traitement visuel des mots, quelle que soit leur difficulté d'accès lexical.

Des résultats émanant d'autres auteurs confirment cette interprétation. Tout d'abord, un effet de l'indigage a par la suite été retrouvé en reconnaissance de mots (Auclair & Siéroff, 2002). Ensuite, d'autres études ont montré que l'amorçage sémantique d'un mot par un autre n'a lieu que quand l'attention des sujets est orientée dans la régions de l'espace qu'occupera le mot-amorce (Besner, Risko, & Sklair, 2005 ; Waechter et al., 2011). Lorsque l'emplacement d'apparition du mot-amorce est incertain, le sujet doit distribuer son attention visuelle sur la totalité de la scène. La quantité d'attention que reçoit alors le mot-amorce est trop faible, et l'amorçage sémantique n'a pas lieu. À l'inverse, quand le sujet peut prévoir l'apparition du mot-amorce et distribuer son attention en conséquence, l'amorçage a lieu.

D'autres études ont utilisé l'effet Stroop, c'est-à-dire l'interférence sémantique entre un mot écrit renvoyant à une couleur (par exemple, les mots ROUGE ou TOMATE) et une autre couleur présente sur la scène, voire, la couleur dans laquelle est écrit le mot, pour étudier le rôle de l'attention. Leurs auteurs ont mesuré l'influence d'un mot dont le sens renvoie à une couleur sur le traitement d'une zone de couleur, lorsque les deux sont présentés simultanément aux sujets. La zone pouvait être indicée ou non. Lorsque la zone est composée d'une couleur unique, son indigage ne réduit pas l'effet du mot sur son traitement (Lachter, Ruthruff, Lien, & McCann, 2008) : la zone est si simple à traiter que l'attention visuelle peut être mobilisée lors du traitement du mot malgré l'indice qui l'oriente vers une autre position. En revanche, lorsque le traitement de la zone de couleur est suffisamment exigeant (par exemple, une zone composée de deux couleurs et on demande de reporter la couleur dominante), le mot n'a pas d'effet sur le traitement de la zone de couleur : l'attention visuelle est entièrement mobilisée pour analyser celle-ci (Robidoux & Besner, 2015).

Ces résultats multiples et variés montrent l'implication de l'attention visuelle dans le traitement visuel des mots. Cette controverse est aussi tranchée par la littérature sur l'attention visuelle pour l'analyse de scènes quelconques (Carrasco, 2011 ; Frintrop, Rome, & Christensen, 2010) : la capacité de traitement de notre système visuel étant limitée, l'attention permet de hiérarchiser les stimuli à traiter en priorité (pour plus de détails, voir Section 3.3). Elle est donc en permanence mobilisée en fonction des besoins pour explorer et faciliter l'analyse de la scène visuelle. Des items aussi complexes que des mots ne font a priori pas exception.



**FIGURE 2.1** – Proposition de synthèse du processus d'analyse visuelle des mots et de leurs unités en fonction de leur taille. Tiré de Dehaene et al. (2005).

### 2.1.2 Nature de l'attention impliquée dans le traitement des mots

Si l'attention visuelle est nécessaire dans le traitement visuel des mots, il reste encore à préciser quelles dimensions de l'attention sont impliquées. Le processus d'analyse visuelle des chaînes de lettres par lequel débute la lecture fait relativement consensus. Elle démarre par l'extraction des caractéristiques élémentaires des lettres (segments, intersections, courbes, etc.) qui sont ensuite sélectionnées en fonction de leur pertinence puis recombinaison pour aboutir à une représentation abstraite de l'identité des lettres. Ce processus résulte d'un apprentissage perceptif par exposition répétée au code écrit (McCandliss, Cohen, & Dehaene, 2003). En effet, les lettres issues de l'alphabet dont on est lecteur sont mieux reconnues que celles d'un alphabet que l'on ne connaît pas, même après entraînement jusqu'à des performances équivalentes en reconnaissance de lettres isolées (Pelli, Burns, Farell, & Moore-Page, 2006).

Une fois traitées, les lettres sont ensuite combinées en unités dont la taille varie selon le modèle théorique considéré. Le modèle théorique de « Combinaison de Détecteurs Locaux » (*local combination detectors*, LCD; Dehaene, Cohen, Sigman, & Vinckier, 2005) propose une synthèse de ces différentes étapes de traitement et les relie à des résultats d'études en neuro-imagerie (voir Figure 2.1). Le modèle BRAID (Phénix, 2018) suppose quant à lui que les lettres sont immédiatement combinées en mot.

Le rôle des mécanismes attentionnels dans ce processus est multiple. Les caractères écrits ayant une résolution qui ne permet leur analyse que dans la zone restreinte de la fovéa (3-5° du champ visuel), le lecteur doit réaliser plusieurs saccades pour pouvoir traiter toutes les portions du texte à lire (Rayner, 2014). Le processus de contrôle oculaire pendant la lecture a été notamment décrit par le modèle EZ-reader (Reichle, Warren, & McConnell, 2009). Basé

sur différents résultats expérimentaux sur le comportement oculomoteur en général, il fait l'hypothèse que lorsque le traitement des mots sur lesquels le regard est posé est suffisamment avancé, le lecteur commence à orienter son attention vers les mots suivants avant de déplacer son regard. Ce stade est dit « pré-attentif » car seuls les composants de basse fréquence des mots suivants sont traités et l'information ainsi extraite est utilisée pour préparer la saccade qui les placera sur la fovéa. La saccade est initiée quand le mot en cours de traitement est complètement analysé. Ce modèle rend ainsi compte des déplacements attentionnels et oculaires successifs sur les mots d'un texte en faisant l'hypothèse d'un mécanisme contrôlé **d'orientation de l'attention**.

Plusieurs travaux avancent que la vitesse d'orientation de l'attention est fortement impliquée pendant l'apprentissage de la lecture. Une étude longitudinale de Franceschini et al. (2012) a suivi des enfants depuis leur dernière année de maternelle jusqu'au CE1. Chaque année, ils ont passé une variante de la tâche de Posner qui impliquait de discriminer l'orientation d'une ellipse, précédée ou non d'un indice, et une tâche de recherche visuelle de cible en présence de distracteurs sans contrainte de temps. Les performances des enfants à ces deux tâches sont, selon les auteurs, directement liées à la vitesse d'orientation de l'attention dans l'espace. Leur performance en condition valide de la tâche de Posner et en recherche visuelle de cible en dernière année de maternelle prédit selon les auteurs les performances en lecture de mots et de pseudo-mots en CP et CE1, après contrôle des effets potentiels du QI, de l'âge des participants et de leurs compétences phonologiques. Les auteurs concluent que la vitesse d'orientation de l'attention est un précurseur de la lecture. Une expérience menée par la même équipe impliquant des participants dyslexiques montre que ces derniers ont de plus faibles performances en tâche de détection avec indicage préalable (Facoetti, Paganoni, & Lorusso, 2000) quelle que soit la condition et que l'indice n'a pas d'effet facilitateur sur leur analyse visuelle. Les auteurs interprètent ces résultats comme marque d'un déficit de **l'orientation de l'attention**, accompagné d'un déficit dans le mécanisme de **sélection pré-attentive**. Cependant, l'interaction des performances avec la validité de l'indice laisse penser que d'autres mécanismes attentionnels pourraient être mobilisés dans cette tâche. De plus, l'indice utilisé implique un contrôle *bottom-up* de l'attention (voir Chapitre 3 pour une définition), or la lecture mobilise plutôt un contrôle *top-down*.

D'autres études prétendent identifier d'autres mécanismes attentionnels dont le déficit serait à l'origine de la dyslexie. Certaines avancent qu'un déficit de l'engagement de l'attention (*sluggish attentional shift*) nuit au traitement de stimuli visuels rapides (Hari & Renvall, 2001 ; Lallier et al., 2010 ; Lum, Conti-Ramsden, & Lindell, 2007). Constaté dans la modalité auditive (Facoetti et al., 2003) et potentiellement amodal (Lallier et al., 2010), ce déficit se traduit par un clignement attentionnel (ou *attentional blink*) plus long, c'est-à-dire une période suivant la détection d'un premier stimulus d'intérêt pendant laquelle toute identification d'un deuxième stimulus est impossible. Dans sa modalité auditive, il pourrait expliquer les faibles compétences phonologiques constatés chez certains dyslexiques.

Par ailleurs, certaines populations de dyslexiques semblent avoir un défaut dans la distribution de leur attention, avec une mini-négligence dans leur hémichamp gauche (Facoetti & Molteni, 2001 ; Hari & Renvall, 2001) et une tendance à **diffuser trop largement** leur attention dans l'espace (Facoetti et al., 2000), au détriment de l'effet facilitateur que l'attention induit sur le traitement perceptif.

Quoi qu'il en soit, les résultats précédents concernent surtout le comportement dynamique de l'attention. Or, l'attention est aussi utilisée chaque instant pour hiérarchiser les éléments visuels à traiter en fonction de leur pertinence. Le modèle SWIFT (Engbert, Nuthmann, Richter, & Kliegl, 2005) est un autre modèle qui décrit le comportement oculomoteur en

lecture. A la différence du modèle EZ-Reader, il suppose que l’accès lexical au mot de la phrase n’est pas strictement lié à son ordre dans la phrase, le traitement de mots consécutifs pouvant se faire en parallèle. Comment ce traitement parallèle se déroule-t-il ?

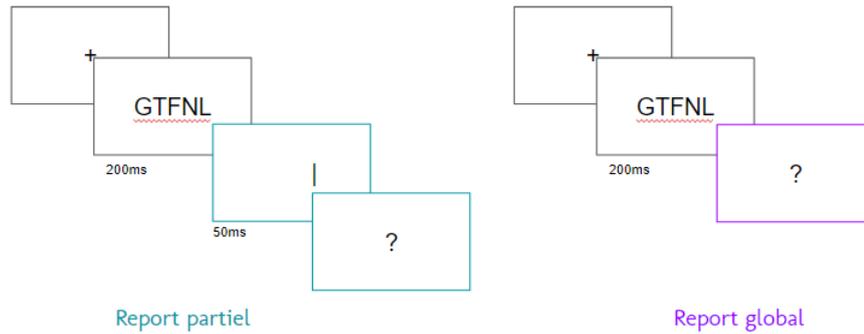
Selon la Théorie de l’Attention Visuelle (*Theory of Visual Attention*, TVA ; Bundesen, Habekost, & Kyllingsbæk, 2005), utilisée pour modéliser l’attention visuelle aussi bien d’adultes sains que cérébro-lésés (pour une revue, voir Habekost & Starrfelt, 2009), deux paramètres influencent l’analyse d’une scène visuelle quelconque : la capacité de traitement visuel et la capacité de stockage du résultat de ce traitement. Selon cette théorie, le traitement visuel revient à accumuler des informations sur les stimuli perçus jusqu’à pouvoir les catégoriser (c’est-à-dire, reconnaître qu’un objet visuel est une chaîne de lettre ou l’image d’un animal même si l’on n’en connaît pas encore précisément l’identité). La quantité d’information extraite par unité de temps dépend de la quantité de ressources attentionnelles disponibles, ce qui correspond dans ce modèle à la **capacité de traitement visuel**. Une fois catégorisé, le résultat de l’analyse visuelle peut être stocké en mémoire à court-terme. Cette mémoire est limitée : les éléments y entrent au fur et à mesure qu’ils sont analysés et une fois que la mémoire est remplie, aucun autre élément n’y entre. La limite est celle de la **capacité de stockage**. Il s’avère que les dyslexiques présentent un déficit de la capacité de traitement visuel (Stenneken et al., 2011) et que cette capacité de traitement est corrélée à la vitesse de lecture du jeune lecteur (Lobier et al., 2013). C’est à cette capacité de traitement que ce travail de thèse s’intéresse plus particulièrement.

### 2.1.3 Propriétés de l’empan visuo-attentionnel

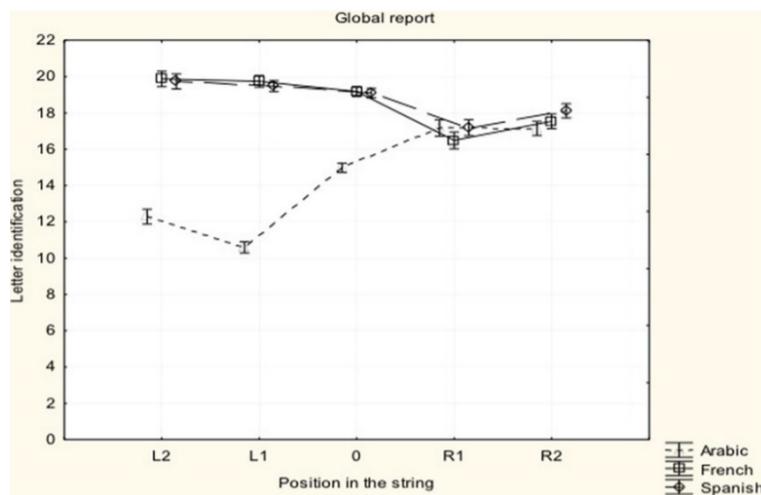
La capacité de traitement visuel peut s’estimer expérimentalement par la mesure du nombre d’items que l’on peut traiter simultanément en une fixation. Le résultat de cette mesure est nommé empan visuo-attentionnel. Le rôle de l’empan visuo-attentionnel dans la lecture experte et son apprentissage est largement documenté. Bien qu’ils soient souvent confondus, l’empan visuo-attentionnel, l’empan perceptif et l’empan visuel sont des mesures distinctes (pour plus de détails, voir Frey & Bosse, 2018). L’empan perceptif correspond au nombre de lettres desquelles sont extraites des informations utiles lors de la lecture de texte (McConkie & Rayner, 1975). L’empan visuel est le nombre de lettres d’une taille donnée et disposées linéairement qui peuvent être identifiées (O’Regan, 1990), indépendamment du mode de traitement, parallèle ou séquentiel, des items.

Quant à l’empan visuo-attentionnel (voir Figure 2.2), sa définition n’est pas spécifique aux lettres puisqu’il correspond au nombre d’éléments visuels distincts qui peuvent être traités simultanément dans une configuration de plusieurs éléments. L’empan visuo-attentionnel est le plus souvent estimé à partir des performances des participants sur des tâches de report partiel ou global de séquences de lettres (Valdois, Bosse, & Tainturier, 2004). Toutes deux commencent par la présentation d’une chaîne de consonnes pendant 200 ms. Cette durée courte garantit un traitement parallèle de la chaîne car elle ne permet pas au sujet d’effectuer une saccade avec une reprise d’information (Pelli et al., 2006). Une fois que la chaîne de consonnes disparaît, le sujet doit soit rappeler la totalité des lettres qui la composent s’il réalise un report global, soit rappeler la lettre dont la position dans la séquence est indiquée par une barre verticale, s’il réalise un report partiel. La capacité des sujets à reconnaître normalement les lettres isolées est contrôlée par une tâche supplémentaire de seuil d’identification de lettre.

Même si les épreuves classiques d’empan visuo-attentionnel utilisent du matériel littéral (séquences de lettres ou chiffres), l’empan visuo-attentionnel peut aussi être estimé de



**FIGURE 2.2** – Illustration des tâches de report partiel et global utilisées notamment par Bosse et al. (2007).



**FIGURE 2.3** – Nombre de lettres correctement identifiées en tâche de report global en fonction de la position des lettres dans la chaîne chez des personnes parlant l'espagnol, le français ou l'arabe. Tiré de Awadh et al. (2016).

façon similaire à partir de séquences d'items non-verbaux. Une expérience a évalué l'empan visuo-attentionnel non-verbal de sujets dyslexiques et sains (Lobier, Zoubrinetzky, & Valdois, 2012), en faisant varier deux conditions (items verbaux uniquement vs items non-verbaux). Les résultats montrent un écart de performance similaire entre sujets dyslexiques et sujets contrôles pour les deux conditions, en l'absence d'interaction. Parce que les stimuli « non-verbaux » étaient trop nouveaux pour que les sujets en aient une représentation phonologique, ces résultats suggèrent que le déficit à l'œuvre chez les participants dyslexiques est purement visuo-attentionnel et que l'empan visuo-attentionnel n'est pas spécifique aux stimuli verbaux.

Par ailleurs, l'empan visuo-attentionnel n'est pas restreint à la seule dimension horizontale de la scène visuelle. Dans une variante de la tâche de report, les lettres sont disposées non pas sur une ligne mais sur un cercle (Dubois et al., 2010 ; Lobier et al., 2013). Les performances des enfants (8 et 9 ans) dans cette variante sont fortement corrélées à leurs performances pour la tâche de report classique, en présentation horizontale. Ce résultat suggère que l'empan visuo-attentionnel mesure un mécanisme dont l'étendue spatiale est à 2 dimensions.

Enfin, les propriétés de l'empan visuo-attentionnel dépendent des caractéristiques de la

langue écrite des sujets (voir Figure 2.3). L’empan visuo-attentionnel est plus grand en français et en espagnol qu’en arabe, et présente une asymétrie qui correspond au sens de lecture de la langue (Awadh et al., 2016). Il est également modulé par les caractéristiques des langues en condition de bilinguisme (Lallier, Molinaro, Lizarazu, Bourguignon, & Carreiras, 2017).

## 2.2 Liens entre l’empan visuo-attentionnel et l’apprentissage la lecture

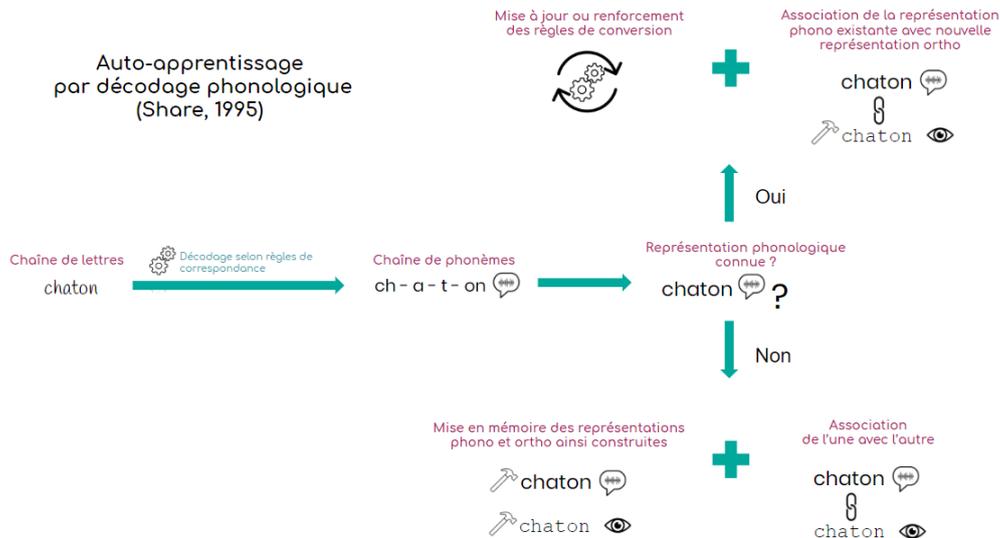
Parmi les dimensions de l’attention visuelle impliquées dans la lecture, nous nous intéresserons dans ce travail de thèse à la capacité de traitement, que l’on estime par l’empan visuo-attentionnel. Nous allons voir dans cette section son rôle dans l’apprentissage de la lecture et l’impact de son entraînement sur les performances en lecture.

### 2.2.1 Empan VA et apprentissage de la lecture non-pathologique

L’apprentissage de la lecture d’une langue alphabétique nécessite d’acquérir le principe alphabétique, c’est-à-dire prendre conscience du fait qu’il existe des unités orthographiques et phonologiques et que ces unités entretiennent des liens non arbitraires. De nombreuses travaux ont étudié le rôle des compétences phonologiques, et plus précisément la capacité des apprentis lecteurs à manipuler les phonèmes au sein d’unités phonologiques plus grandes, pour l’apprentissage de la lecture (Castles & Coltheart, 2004 ; Ehri, 2005). Ces compétences leur permettraient de mieux décoder les nouveaux mots qu’on leur présente et d’en élaborer ensuite en mémoire une meilleure représentation orthographique. C’est en tout cas ce qu’avance la théorie de l’auto-apprentissage par décodage phonologique (*Phonological decoding self-teaching*, Share, 1995), qui est illustrée Figure 2.4.

Selon cette théorie, la représentation orthographique d’un mot peut être apprise suite à un traitement phonologique réussi. Lors du décodage, l’apprenti lecteur associe les différents graphèmes aux phonèmes correspondants de manière à générer la forme phonologique du mot. Si la séquence phonologique générée correspond à la représentation phonologique d’un mot stocké en mémoire, il associe à ce dernier la représentation orthographique de la chaîne de lettres qu’il vient de traiter. Si besoin, il met ensuite à jour les règles de correspondance graphèmes-phonèmes, par exemple s’il a rencontré un mot à l’orthographe irrégulière, ou s’il a appliqué une règle erronée qu’il doit corriger. Au fur et à mesure de l’apprentissage, ces règles s’affinent et tiennent compte des effets positionnels et morphémiques. En revanche, si l’apprenti lecteur ne trouve pas de représentation phonologique associée à la suite de phonèmes, il stocke en mémoire et lie ensemble les formes phonologiques et orthographiques qu’il vient d’élaborer de ce mot nouveau. Hormis la transmission initiale des règles de correspondance, ce processus a lieu sans retour correctif obtenu d’un tuteur ou d’une source d’information quelconque : c’est pour cela que Share (1995) parle d’auto-apprentissage.

Bien que l’apprentissage comporte des processus phonologiques et orthographiques, pour l’auteur ce sont les premiers qui ont, selon ses propres mots, « la part du lion » dans l’apprentissage de la lecture. Il défend l’idée que les différences de compétences dans le processus d’analyse visuelle et orthographique des chaînes de lettres dépendent principalement de la qualité des traitements réalisés au niveau phonologique. L’implémentation de l’auto-apprentissage par décodage phonologique proposée par Ziegler, Perry, et Zorzi (2014) le prend au mot : son architecture est basée sur celle du modèle CDP++ (Perry, Ziegler, & Zorzi,



**FIGURE 2.4** – *Illustration de la théorie de l’auto-apprentissage par décodage phonologique (Share, 1995).*

2010), dont les composantes sont principalement phonologiques. Le lecteur pourra trouver un exemple équivalent dans Pritchard, Coltheart, Marinus, et Castles (2018).

Pourtant, l’implication des mécanismes visuo-attentionnels dans l’apprentissage de la lecture, et en particulier la capacité de traitement visuel est loin d’être minoritaire. Le modèle développé par LaBerge et Samuels (1974) suppose que l’automatisation de la reconnaissance visuelle des sous-unité lexicale nécessite de mobiliser son attention lors du traitement de ce mot. Dans ce processus, l’empan visuo-attentionnel semble impliqué. En effet, lorsque l’on mesure l’empan d’enfants qui débutent leur apprentissage de la lecture, ainsi que leurs compétences phonologiques, leur mémoire à court terme et leur QI, on se rend compte qu’en contrôlant tous les autres facteurs, l’empan prédit les capacités de lecture en fin de CP (Bosse & Valdois, 2009). De plus, l’empan augmente au fur et à mesure des années. Contrairement aux compétences phonologiques qui ne sont prédictives qu’en début d’apprentissage, son influence se manifeste sur le score en lecture tout au long du primaire. Elle tend à diminuer pour les mots réguliers et les pseudo-mots mais reste stable pour la lecture des mots irréguliers au cours des années en école primaire. Au-delà du score, l’empan visuo-attentionnel contribue notamment à expliquer la vitesse de lecture (Bosse & Valdois, 2009 ; Lobier et al., 2013). Cela suggère que l’empan est fortement impliqué dans l’acquisition des représentations orthographiques, de manière précoce et continue.

Ces résultats peuvent être interprétés dans le cadre du modèle MultiTraces (MTM ; Ans, Carbonnel, & Valdois, 1998). Le modèle MTM fait l’hypothèse qu’un mot peut être traité soit dans sa globalité en une fixation (mode global), soit séquentiellement à l’aide de plusieurs déplacements attentionnels (mode analytique). Ces deux modes s’incarnent au sein d’un réseau unique, contrairement aux modèles dits en « en double-voie » (pour une revue des modèles de lecture à haute voix et de reconnaissance de mots, voir Phénix, Diard, & Valdois, 2017).

La capacité de traitement visuo-attentionnel est modélisée par une fenêtre dont la taille module le nombre de lettres qui sont traités simultanément (voir Figure 2.5). Dans le mode global, celle-ci couvre la largeur du mot analysé : des informations issues de la totalité des lettres qui composent la chaîne de lettres sont extraites simultanément. Par défaut, le traitement d’une chaîne de lettres débute toujours selon le mode global. Si le résultat de

### Modèle MTM (Ans et al., 1998)



**FIGURE 2.5** – Structure générale du modèle MTM et illustration de la distribution de l’attention visuelle sur le mot CHAT. À gauche, le schéma montre les relations entre les systèmes orthographiques, phonologiques et lexicaux du modèle. À droite, le graphique montre la distribution de l’attention visuelle lorsque la taille de la fenêtre attentionnelle est égale à 3. En abscisses se trouvent les positions des lettres du mot et en ordonnées la quantité d’attention visuelle qui y est allouée. À l’intérieur de la fenêtre cette quantité vaut 1 sur chaque lettre et 0,5 à l’extérieur.

l’analyse de la chaîne de lettres ainsi réalisée n’est pas satisfaisant selon un retour correctif généré par le niveau mot du modèle, le traitement bascule en mode analytique. Dans ce mode, la taille de la fenêtre est restreinte aux unités sous-lexicales, chacune étant analysée dans le contexte des lettres voisines (dans CHAT, CHA est analysé comme \_ CHA T) La fenêtre proposée par le modèle MTM agit comme un filtre attentionnel binaire : les lettres à l’intérieur de la fenêtre attentionnelle sont activées au maximum (à 1) alors que les lettres à l’extérieur de la fenêtre sont moins activées (à 0,5).

Au départ, l’apprenti lecteur décode les mots en traitant de manière séquentielle et analytique les différentes unités qui le composent. Cela correspond à ce que les données suggèrent : les apprentis lecteurs ont une vitesse de lecture proportionnelle à la taille du mot (Aghababian & Nazir, 2000). Un empan suffisamment grand donne la capacité de traiter de grandes unités orthographiques (graphèmes longs, syllabes, mots entiers), et de créer ou renforcer en mémoire les représentations orthographiques correspondantes (Valdois et al., 2004). Avoir à la fois un empan visuo-attentionnel grand et des représentations orthographiques plus nombreuses en mémoire permet petit à petit de passer vers un mode de lecture global. Ce passage pourrait être indiqué par la disparition progressive des effets de longueur qui, en fonction de la fréquence et de la longueur du mot, peuvent se maintenir jusqu’à la 5<sup>ème</sup> année d’instruction (Aghababian & Nazir, 2000). Cela est d’autant plus plausible dans les langues qui possèdent une grande proportion de graphèmes complexes (Antzaka et al., 2018).

## 2.2.2 Empan visuo-attentionnel réduit et dyslexie

Pendant longtemps, la dyslexie était caractérisée non pas en fonction du déficit cognitif qui la sous-tend mais en fonction des profils de lecture et des types d’erreur produits par les participants. Ces indicateurs étaient interprétés grâce aux modèles computationnels de lecture à voix haute dits « modèles à double-voie ». Ces derniers postulent qu’un mot peut être analysé soit par une première voie, consistant en un traitement lexical global, soit par

la seconde voie, consistant en une conversion graphème-phonème successive des unités qui le composent. La dyslexie était alors séparée en deux sous-types, correspondant au déficit de l'une ou l'autre de ces deux voies de lecture :

- les dyslexies « phonologiques » correspondraient à un déficit de la voie de conversion graphème-phonème, conduisant à des erreurs lors de la lecture de mots nouveaux ou peu familiers ;
- les dyslexies de surface seraient dues au dysfonctionnement de la voie de traitement lexicale conduisant à des erreurs en lecture de mots irréguliers (FEMME lu /fɛm/ et non /fam/).

Un troisième type, la dyslexie mixte, regroupait les individus cumulant ces deux types de profils (déficit sur tous les types de mots).

Cette distinction présentait plusieurs limites. D'une part, la majorité des individus dyslexiques présentent un tableau clinique mixte (Castles & Coltheart, 1993 ; Sprenger-Charolles, Siegel, Jimenez, & Ziegler, 2011 ; Stanovich, Siegel, & Gottardo, 1997 ; Ziegler, Castel, Pech-Georgel, Alario, & Perry, 2008). D'autre part, ces catégories de dyslexie ne permettent pas de prédire l'évolution des performances en lecture au cours du temps (Peterson, Pennington, Olson, & Wadsworth, 2014). De plus, pour constituer une taxonomie, la définition de sous-types doit correspondre à des déficits cognitifs et des dysfonctionnements cérébraux distincts. Les catégories classiques définies à partir des profils de lecture ne remplissent pas ces critères.

Des données récentes montrent que la population d'enfants dyslexiques peut être séparée en fonction d'un déficit soit des compétences phonologiques, soit de l'empan visuo-attentionnel (Zoubrinetzky, Collet, Serniclaes, Nguyen-Morel, & Valdois, 2016). Les enfants qui présentent un déficit unique de l'empan visuo-attentionnel n'ont pas nécessairement des compétences phonologiques altérées (Bosse et al., 2007 ; Valdois et al., 2011 ; Valdois, Peyrin, et al., 2014) et réciproquement. Ces deux populations ne profitent pas des mêmes remédiations : chez les enfants présentant un déficit visuo-attentionnel, les entraînements qui ciblent spécifiquement l'attention visuelle sont plus efficaces que chez les enfants qui ont de faibles compétences phonologiques (Zoubrinetzky, 2015).

Certains auteurs ont suggéré que les déficits visuo-attentionnels constatés chez les dyslexiques résultaient en réalité d'une baisse des compétences phonologiques (Ramus et al., 2003). Pourtant, même après contrôle des compétences phonologiques, les performances des enfants dyslexiques en tâches d'empan visuo-attentionnel expliquent toujours une proportion de la variance des capacités de lecture (Bosse et al., 2007). Ces deux sous-types cognitifs sont par ailleurs caractérisés par des schémas d'activations cérébrales différents : le sous-type de dyslexie associé à une réduction de l'empan visuo-attentionnel est caractérisé par une sous-activation des lobules pariétaux supérieurs (Peyrin, Démonet, N'Guyen-Morel, Le Bas, & Valdois, 2011), zone impliquée dans le traitement simultané de plusieurs éléments (Lobier, Peyrin, Le Bas, & Valdois, 2012), alors que le sous-type de dyslexie avec déficit des compétences phonologiques présente plutôt une activation réduite des régions périsylviennes gauches, comme le gyrus frontal inférieur gauche et le gyrus supramarginal (Démonet, Taylor, & Chaix, 2004 ; Peyrin et al., 2012). Enfin, comme mentionné plus haut, le déficit de l'empan visuo-attentionnel n'est pas spécifiquement verbal et est aussi constaté dans des tâches de catégorisation d'items non-verbaux (Lobier, Zoubrinetzky, & Valdois, 2012). S'ils peuvent apparaître conjointement, ces deux déficits sont donc indépendants.

L'impact d'un empan visuo-attentionnel réduit peut là encore s'expliquer dans le cadre du modèle MultiTraces de Ans et al. (1998). Si on simule une réduction de l'empan visuo-attentionnel par une fenêtre étroite de traitement, alors un mot ne peut pas être analysé

Identification	Comparaison de séquences	Recherche visuelle	Catégorisation
Vois-tu la lettre “b” ?	Où est la séquence “abo” ?	Trouves l'intrus	Y a-t-il un chiffre dans la séquence suivante ?
gbpq	abq apo ado abo edo	b p b b p b b p	A&cE4

**FIGURE 2.6** – Exemple de tâche d’identification, de comparaison de séquence, de recherche visuelle et de catégorisation avec des stimuli verbaux.

de manière globale, et on doit alors le déchiffrer systématiquement de manière analytique. Ce changement de stratégie augmente la durée nécessaire pour traiter le mot et favorise les erreurs de régularisation sur les mots irréguliers. Dans les cas les plus sévères, même les graphèmes deviennent difficiles à analyser.

### 2.2.3 Tâches d’entraînement de l’empan visuo-attentionnel

Entraîner les compétences phonologiques permet d’améliorer les performances en lecture, que ce soit en prévention (Bus & Van Ijzendoorn, 1999) ou en remédiation (Thomson, Leong, & Goswami, 2013). La question que l’on peut se poser maintenant est, sachant que l’empan visuo-attentionnel est aussi un précurseur de la lecture, comment l’entraîner de manière à améliorer effectivement les performances en lecture ? Les principales tâches utilisées dans la littérature pour entraîner l’empan visuo-attentionnel sont des tâches d’identification, de recherche visuelle, de catégorisation et de comparaison de séquences (voir Figure 2.6).

Dans les **tâches d’identification**, le participant doit reconnaître une cible en particulier. Par exemple, on montre brièvement une séquence de lettres au participant et on lui demande si la séquence contenait « b ». Cette tâche nécessite une granularité attentionnelle fine et mobilise le traitement parallèle des items de la séquence pourvu que plusieurs éléments concurrents soient présentés simultanément avec une contrainte de temps forçant un traitement parallèle de la séquence (temps de présentation inférieur ou égal à 200 ms). C’est le principe même de la tâche de report utilisée pour mesurer l’empan visuo-attentionnel.

Dans une **tâche de comparaison de séquences**, le participant doit retrouver, parmi plusieurs séquences affichées simultanément, celle qui correspond à la séquence cible qui lui a été présentée. Par exemple, la séquence ABO apparaît, puis elle disparaît et une autre séquence s’affiche à l’écran. Le sujet doit dire si les deux séquences étaient identiques ou non (pour un autre exemple de comparaison de séquence, voir Figure 2.6). En terme d’allocation de l’attention visuelle, la comparaison de séquences active les mêmes zones corticales que celles qui s’activent quand l’empan visuo-attentionnel est mesuré, ce qui laisse penser que les participants mobilisent leur capacité de traitement visuel parallèle de plusieurs items, que ce soit à l’échelle de la lettre ou de la séquence (Reilhac, Peyrin, Démonet, & Valdois, 2013).

Durant une **tâche de recherche visuelle**, le participant doit retrouver un item de référence dans une scène visuelle de complexité variable. Par exemple, quand il réalise une tâche de recherche de conjonction, le participant fait face à un ensemble d’items résultant de la combinaison de deux propriétés visuelles (par exemple, des barres verticales noires et des barres horizontales blanches) et doit trouver parmi elles un intrus (une barre verticale blanche). Les performances en recherche visuelle sont corrélées au score en tâche de report, suggérant que les participants mobilisent leur traitement parallèle des items pour l’effectuer (Lallier, Donnadiou, & Valdois, 2013).

Durant une **tâche de catégorisation**, le sujet doit reconnaître la catégorie à laquelle appartient l’item cible. Par exemple, une séquence de caractères alphanumériques est présentée en temps limité et le sujet doit dire si la séquence contient des chiffres, ou combien de chiffres ont été présentés (Lobier, 2008). Les tâches de catégorisation mettent en jeu l’empan visuo-attentionnel comme les tâches d’identification mais nécessitent une analyse visuelle du stimulus moins poussée que dans une tâche d’identification. En effet, les sujets mettent plus de temps à réaliser les tâches d’identification que de catégorisation (Grill-Spector & Kanwisher, 2005). Certaines théories font d’ailleurs de la catégorisation une étape préliminaire à l’identification (Bundesen et al., 2005).

#### 2.2.4 Effet de l’entraînement de l’empan visuo-attentionnel sur les performances en lecture

Les tâches décrites précédemment ont été utilisées dans deux protocoles de remédiation des dyslexies d’origine visuo-attentionnelle : COREVA et MAEVA. COREVA est une méthode de remédiation qui cible spécifiquement l’empan visuo-attentionnel (Valdois, Bosse, & Peyrin, 2014). Elle contient 450 exercices à réaliser 20 minutes par jour pendant six semaines. Ces exercices sont des exercices de recherche visuelle, d’appariement d’items et de discrimination qui se résolvent par traitement simultané des stimuli en présence. Ce programme a été évalué chez une enfant bilingue franco-espagnole dyslexique qui présentait un trouble de l’empan visuo-attentionnel et des capacités phonologiques préservées. Cette enfant a été suivie pendant 17 mois. Au terme de l’entraînement, son empan visuo-attentionnel avait augmenté jusqu’à atteindre un niveau normal pour son âge (Valdois, Peyrin, et al., 2014). Ses performances en lecture ont également augmenté, avec un effet plus fort en langue française. Cette amélioration a été maintenue à long terme et s’est accompagnée, au niveau cérébral, d’une augmentation de l’activité des lobules pariétaux supérieurs. Cependant, COREVA incluait des items verbaux (syllabes, mots courts) et était un programme d’entraînement sur papier : il ne permettait pas de présenter les stimuli pendant une durée suffisamment courte de manière à garantir un traitement strictement parallèle des items visuels.

Un logiciel informatique d’entraînement de l’empan visuo-attentionnel, MAEVA, a alors été conçu (Lobier, 2008). En plus de contrôler le temps de présentation des stimuli, l’utilisation d’un support informatique présente l’avantage de mesurer et d’enregistrer les progrès des participants au fur et à mesure de l’entraînement, et donne en général de meilleurs résultats sur les enfants que son équivalent papier (Mioduser, D. Tur-Kaspa, H., et Leitner, I., 2000). Dans MAEVA, les items à traiter pouvaient être des lettres ou des chiffres, mais aussi des formes géométriques ouvertes ou fermées, des chiffres, ou des caractères hiragana (caractères d’un alphabet japonais). Ces items constituent plusieurs « familles » de caractères inconnus des participants, rendant impossible leur dénomination individuelle demandée en tâche d’identification classique. Les sujets devaient donc résoudre un exercice de catégorisation qui nécessitait un traitement global de l’ensemble des items pour évaluer le nombre d’items d’une ou des catégories présentées (« combien d’éléments de cette famille as-tu vus ? »). La difficulté des entraînements (temps de présentation des séquences, longueur des séquences et complexité de la tâche) est ajustée automatiquement en fonction des performances observées des élèves grâce à une adaptation de l’algorithme de Wilson, Revkin, Cohen, Cohen, et Dehaene (2006). Dans ses travaux de thèse, Zoubrinetzky (2015) a proposé MAEVA pendant 6 semaines, suivies ou précédées d’un entraînement sur RAPDYS, un logiciel d’entraînement de la perception catégorielle des phonèmes de durée équivalente, à des enfants dyslexiques présentant un trouble de l’empan visuo attentionnel. Les enfants étaient répartis en deux groupes :

l'entraînement de l'empan visuo-attentionnel était proposé au premier groupe avant l'entraînement RAPDYS, alors que le second groupe commençait par RAPDYS puis MAEVA. Les résultats montrent une amélioration significative des capacités d'empan visuo-attentionnel suite à l'entraînement MAEVA (et non RAPDYS). Le nombre de mots lus par minute augmente également plus fortement suite à cet entraînement que lorsque les enfants utilisent le logiciel RAPDYS.

Ces différents résultats montrent qu'une remédiation de l'attention visuelle proposées à des populations qui en présentent un déficit permettent d'améliorer les performances en lecture. Il est donc probable qu'un entraînement de l'attention visuelle reprenant des tâches similaires en début d'apprentissage de la lecture aurait un effet bénéfique sur leur futur niveau de lecture. Notre hypothèse est qu'un tel entraînement mis en place au début de CP augmenterait l'empan visuo-attentionnel, dont le rôle dans l'apprentissage de la lecture a été décrit, et améliorerait les performances en lecture. Cette amélioration serait d'autant plus forte que l'attention visuelle des sujets est faible avant l'entraînement.

#### RÉSUMÉ DU CHAPITRE 2

Quelles sont les dimensions de l'attention visuelle impliquées en lecture et comment les entraîner ? Voici les réponses qu'apporte ce chapitre :

- La lecture est un processus complexe dans lequel la contribution de l'attention visuelle est soutenu par de plus en plus d'études.
- Les déplacements attentionnels permettent de traiter successivement différentes parties d'un texte.
- La capacité de traitement visuel détermine la quantité d'information extraite simultanément d'une portion de texte.
- Le rôle de cette capacité de traitement a été formalisée dans le modèle MTM et est estimée expérimentalement grâce aux tâches de report. Le résultat de cette mesure est l'empan visuo-attentionnel.
- Cet empan visuo-attentionnel est corrélé à la vitesse de lecture et prédit les futures capacités de lecture des pré-lecteurs, après contrôle du QI, de l'âge et des compétences phonologiques. Certains dyslexiques présentent un déficit de l'empan visuo-attentionnel tout en ayant des compétences phonologiques préservées. Ces résultats suggèrent fortement l'existence d'un lien entre les mécanismes impliqués dans la mesure de l'empan visuo-attentionnel et l'apprentissage de la lecture.
- Les tâches d'identification, de catégorisation et de comparaison de séquences ont un effet sur l'empan visuo-attentionnel.
- Entraîner la capacité de traitement visuel par ces tâches permet d'améliorer les performances en lecture d'enfants dyslexiques présentant un déficit visuo-attentionnel.

Ces différents résultats suggèrent qu'entraîner la capacité de traitement visuel des enfants tout-venant en début d'apprentissage de la lecture améliorerait leur futur niveau de lecture.



# Chapitre 3

## Description mathématique de l'attention visuelle

Dans le chapitre précédent, nous avons défendu l'intérêt d'introduire un entraînement de l'attention visuelle et plus particulièrement de la capacité de traitement visuel parallèle pour améliorer les futures performances en lecture des apprentis lecteurs. Cette capacité de traitement visuel s'estime par la mesure du nombre d'items analysés simultanément en une fixation, l'empan visuo-attentionnel. Cependant, pour prétendre augmenter cet empan visuo-attentionnel et améliorer conjointement les capacités de lecture, nous devons d'abord comprendre quels sont les mécanismes en jeu dans ces processus.

Dans ce chapitre, nous proposons un cadre théorique des mécanismes attentionnels et de leur effet sur les tâches visuelles. Ce cadre théorique sera décrit de manière « quasi computationnelle », c'est-à-dire que nous emploierons autant que possible des descriptions mathématiques, afin de bien cerner et définir les mécanismes considérés.

Le point de départ de cette analyse est le modèle BRAID (Phénix, 2018 ; Phénix, Valdois, & Diard, 2018), un modèle de reconnaissance visuelle de mots et de décision lexicale, qui inclut un sous-modèle implémentant un mécanisme visuo-attentionnel. Cependant, dans le contexte de la lecture de mots, et donc dans le modèle BRAID, l'espace visuel considéré est mono-dimensionnel, les stimuli étant des séquences de lettres. Nous proposons donc ensuite une extension de cette description dans l'espace visuel 2D, et décrivons le lien avec la littérature sur l'attention visuelle en général.

### 3.1 Effets généraux de l'attention visuelle sur le traitement perceptif

Si l'on envisage le traitement perceptif comme l'extraction d'informations dans un signal bruité, les ressources attentionnelles agissent sur la perception de différentes manières. Le Perceptual Template Model (PTM ; Lu et al., 2009), en propose trois, non mutuellement exclusives :

- amélioration du signal perceptif : l'attention améliore la qualité de la représentation du stimulus correspondant à un template pertinent pour la tâche, en augmentant le gain de ce template dans le signal ;
- réduction du bruit non pertinent : les ressources prennent la forme de filtres successifs appliqués sur la scène visuelle en fonction du but à atteindre. Ces bruits peuvent être dus à l'incertitude spatiale et temporelle ou à la présence de distracteurs et de

- réduction du bruit propre au traitement perceptif : l'attention réduit le bruit causé par la succession des différentes étapes du traitement perceptif.

En réalité, ces trois mécanismes sont expliqués de la même manière par notre description mathématique. En amplifiant l'activité électrique des neurones dédiés au traitement de l'objet d'intérêt au détriment des autres neurones, le poids associé à la représentation de cet objet est augmenté alors que celui associé aux autres stimuli est diminué. De plus, l'impact du bruit induit par le traitement perceptif est limité, étant donné que la représentation de l'objet à traiter est plus « forte ».

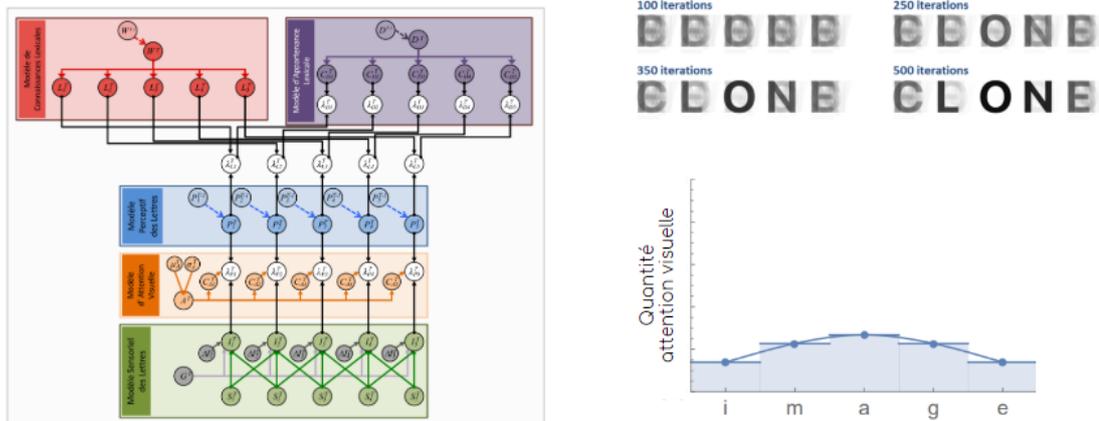
Cette amélioration du signal a deux conséquences au niveau comportemental. Les sujets perçoivent les stimuli vers lesquels ils ont orienté leurs ressources attentionnelles avec une plus grande résolution spatiale et ils les traitent plus rapidement (Carrasco & McElree, 2001). En effet, la *résolution spatiale* est le niveau de détails avec lequel est perçu un ou plusieurs stimuli. Cette définition recouvre aussi l'acuité visuelle, même si certains auteurs la séparent de la résolution spatiale (e.g., Carrasco, 2011). Plusieurs expériences qui nécessitent une discrimination fine des stimuli ont montré que les ressources attentionnelles amélioreraient la résolution spatiale avec laquelle les stimuli étaient perçus (pour une revue, voir Carrasco, 2011). C'est le cas dans des tâches de discrimination de texture (Yeshurun & Carrasco, 1998), de recherche spatiale (Carrasco & Yeshurun, 1998), de détection de cible à faible contraste (Carrasco, Giordano, & McElree, 2004 ; Posner, Nissen, & Ogden, 1978), et même d'identification de lettres (Posner, 1980). Plus un stimulus doit être analysé avec précision, plus son traitement nécessite de ressources attentionnelles. Ce dernier point est particulièrement mis en valeur dans les tâches de crowding (Yeshurun & Rashal, 2010) parfois considérées comme une mesure directe de la résolution spatiale, (voir Intriligator & Cavanagh, 2001) : plus grandes sont les ressources attentionnelles, meilleure est l'analyse visuelle des items en présence, et moins les objets doivent être espacés pour ne plus induire de crowding (Whitney & Levi, 2011). Certaines études de neuro-imagerie suggèrent que l'allocation des ressources attentionnelles dans une région « contracte » les champs récepteurs des neurones de V4, ce qui serait à l'origine de l'amélioration de la résolution spatiale constatée au niveau comportemental (Kastner et al., 2001).

Par ailleurs, les ressources attentionnelles *accélèrent le traitement perceptif* des stimuli auxquels elles sont allouées (Carrasco et al., 2004). Les sujets perçoivent l'apparition du stimulus auquel ils font attention plus tôt que celle du stimulus auquel ils ne font pas attention : c'est l'entrée visuelle préalable (*Prior Visual Entry* ; Titchener, 1908), ce qui suggère que ce stimulus a été traité plus rapidement. Cet effet se retrouve dans les tâches de Posner (Posner, 1980) : si l'indice est au même endroit que la cible, les sujets ont des temps de réactions plus courts que si la cible apparaît à un autre emplacement ou si plusieurs indices apparaissent en même temps. Les ressources attentionnelles ainsi mobilisées accélèrent le temps de traitement de l'information et déclenchent une réponse plus rapide.

## 3.2 Modèle visuo-attentionnel dans le cas 1D

Nous allons à présent décrire le rôle de l'attention visuelle en lecture tel que proposé par le modèle de reconnaissance visuelle de mot BRAID.

### Modèle BRAID (Phénix et al., 2018)

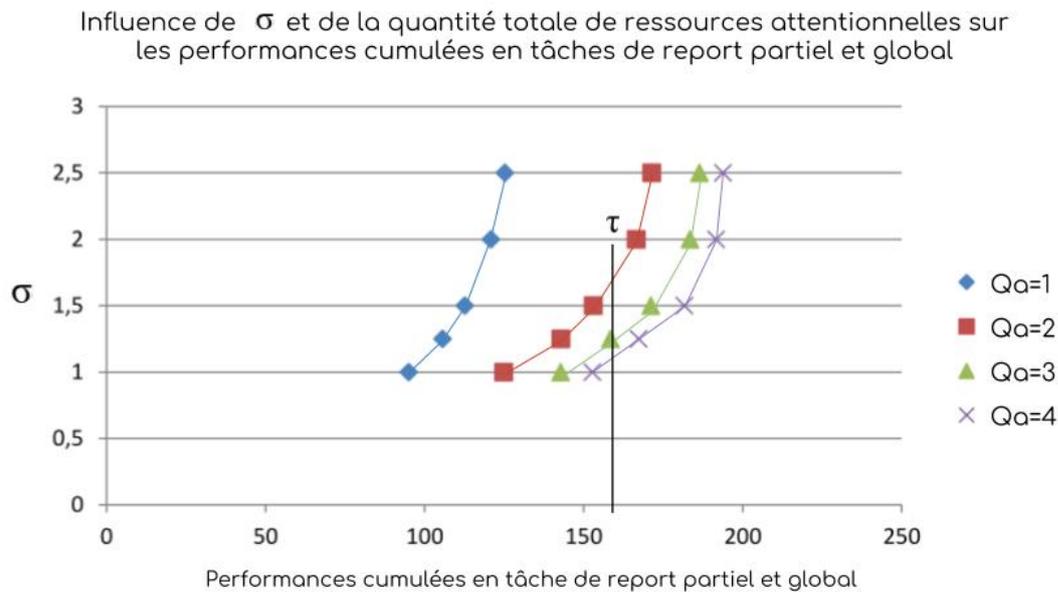


**FIGURE 3.1** – À gauche, représentation schématique du modèle BRAID et de ses sous-modèles (sous modèle attentionnel en orange). À droite, en haut, illustration du résultat du traitement visuel des lettres simulé par BRAID au fur et à mesure des itérations. À droite, en bas, illustration du gradient attentionnel utilisé par défaut par BRAID avec, en abscisse les lettres du mot traité et en ordonnée la quantité d’attention visuelle allouée.

#### 3.2.1 Description du rôle de l’attention visuelle dans BRAID

Le modèle BRAID (voir Figure 3.1 et Phénix, 2018) est un modèle algorithmique bayésien de reconnaissance visuelle de mot, c’est-à-dire qu’il repose sur une architecture de sous-modèles probabilistes. Cette architecture est inspirée de modèles classiques du domaine (comme le modèle IA), mais l’étend en ajoutant notamment un sous-modèle visuo-attentionnel. Dans ce sous-modèle, l’attention visuelle n’est pas décrite comme une « fenêtre », avec des éléments visuels dans ou en dehors de cet intervalle, comme cela pouvait être le cas dans certains modèles (e.g., Ans et al., 1998), mais comme une distribution de probabilité sur l’ensemble des lettres du mot. Cette distribution implémente un filtre attentionnel, qui module le transfert de l’information extraite du stimulus pour la construction des représentations perceptives des lettres. Les éléments visuels « recevant davantage d’attention » sont identifiés plus rapidement et plus efficacement ; en échange, les éléments visuels « recevant moins d’attention » sont identifiés plus difficilement. La distribution visuo-attentionnelle est définie par une loi gaussienne unidimensionnelle, décrite par sa moyenne  $\mu$  et sa variance  $\sigma^2$ . Ainsi,  $\mu$  représente la position du focus attentionnel, et  $\sigma$  la dispersion des ressources attentionnelles autour de celle-ci.

Plus  $\sigma$  est grand, plus l’attention est distribuée largement, et donc moins chaque élément reçoit de ressource attentionnelle. Au contraire, lorsque  $\sigma$  est petit, l’attention est concentrée, ce qui permet le traitement efficace d’un petit nombre de lettres. Les lettres du mot sont traitées en parallèle, mais la distribution gaussienne contrôle la cadence d’extraction d’information visuelle sur chacune d’entre elles. L’intégrale de cette gaussienne, notée  $Qa$ , représente la quantité de ressources attentionnelles disponibles du sujet. Par définition, une distribution de probabilité a une intégrale égale à 1 sur l’espace qui la décrit : la quantité de ressources attentionnelles distribuée sur toutes les lettres est donc limitée. Il est cependant aisé d’étendre le modèle pour que le paramètre  $Qa$  de quantité totale d’attention puisse être modulé, afin de décrire des états hyper-attentifs ou hypo-attentifs.



**FIGURE 3.2** – Valeurs de  $\sigma$  et de  $Q_a$  en fonction des performances cumulées en tâche de report partiel et global. La droite  $x = \tau$  coupe plusieurs courbes du graphe, ce qui indique que plusieurs couples de valeurs pour  $\sigma$  et  $Q_a$  peuvent expliquer un empan visuo-attentionnel  $\tau$  observé.

### 3.2.2 Effet de la distribution attentionnelle sur les tâches visuelles

Le modèle BRAID permet de simuler de nombreuses tâches visuelles : la reconnaissance isolée de lettres, avec ou sans influence lexicale, la reconnaissance visuelle de mots, la décision lexicale, les tâches de comparaison même/différent avec ou sans amorçage. Les simulations montrent de nombreux effets de la distribution attentionnelle sur la réalisation de ces tâches : par exemple, focaliser l'attention diminue localement les effets d'interférence latérale (*crowding*) ; un indice préalable sur une lettre à reconnaître, et une focalisation de l'attention sur cette lettre, module l'effet de supériorité du mot ; etc. La variation de la quantité d'attention utilisée par BRAID reproduit les effets décrits à la Section 3.1 en limitant a posteriori l'effet de l'interférence des distracteurs (influence des lettres voisines) et en augmentant a priori la qualité de la représentation du stimulus (influence lexicale).

Dans des travaux préliminaires<sup>1</sup>, nous avons évalué la capacité du modèle BRAID à rendre compte de l'empan visuo-attentionnel. Pour cela, nous avons simulé avec BRAID les tâches de report partiel et global en faisant varier la quantité de ressources attentionnelles disponibles  $Q_a$  et la variance de la gaussienne attentionnelle  $\sigma^2$  (voir Figure 3.2).

Nous constatons qu'une même performance  $\tau$  aux tâches de report peut être obtenue par plusieurs couples  $\sigma$  et  $Q_a$ . De plus, à quantité de ressources attentionnelles  $Q_a$  fixe, on observe qu'augmenter  $\sigma$  ne permet d'augmenter les performances en tâches de report que jusqu'à un certain seuil, la courbe allant vers une asymptote. Une augmentation de la quantité totale de ressources attentionnelles disponibles  $Q_a$  est nécessaire pour dépasser ce seuil.

1. Ces travaux ont fait l'objet d'un travail de M2, réalisé par Bertrand Metral, sous la supervision de Sylviane Valdois et Julien Diard, en 2016-2017.

Ces observations suggèrent que deux mécanismes expliquent l’empan visuo-attentionnel observé : un empan visuo-attentionnel élevé correspond ainsi soit à une large dispersion  $\sigma$ , soit à une quantité attentionnelle  $Qa$  élevée, soit à une combinaison de ces deux paramètres. Ainsi, si l’on souhaite augmenter l’empan visuo-attentionnel, il faut que l’entraînement que nous allons concevoir contienne soit de larges zones visuelles à traiter, afin de favoriser l’augmentation de  $\sigma$ , soit une grande quantité d’informations visuelles à traiter, afin de favoriser l’augmentation de  $Qa$ , soit, évidemment, une combinaison de ces deux facteurs. À l’inverse, l’observation de petits empan visuo-attentionnels, tel qu’observé par exemple chez certains faibles lecteurs ou lecteurs dyslexiques, pourrait être expliquée par une réduction de la dispersion  $\sigma$ , une quantité réduite d’attention visuelle  $Qa$ , ou une combinaison de ces deux facteurs.

### 3.3 Généralisation à l’espace 2D : un modèle conceptuel de l’attention

BRAID est un modèle qui décrit le rôle de l’attention visuelle sur des chaînes de lettres dans un espace à une dimension. Nous proposons ici d’étendre cette description de l’attention visuelle à un espace 2D pour des stimuli quelconques. Or, « l’attention visuelle » est un terme dont les contours sont encore flous : il suffit de constater les différences entre les revues issues d’études comportementales (Carrasco & McElree, 2001), d’études en neuro-imagerie (Desimone & Duncan, 1995 ; Petersen & Posner, 2012), ou de modélisations computationnelles (Borji & Itti, 2013 ; Frintrap et al., 2010) pour s’en convaincre.

Pour clarifier notre propos, nous développons donc ici une généralisation du modèle d’attention visuelle du modèle BRAID au cas 2D, et étendons cette description pour y rendre compte des effets et des observations qui font consensus dans la littérature. La structure proposée ici ne constitue pas un « modèle » de l’attention à proprement parler mais permet de fixer un cadre mathématique qui nous permettra ensuite de nommer simplement les différentes composantes de l’attention, et discuter leur participation aux effets observés et à l’entraînement que nous allons concevoir. Les éléments de notre « modèle conceptuel de l’attention » sont listés dans le Tableau 3.1.

#### 3.3.1 L’attention visuelle vue comme une distribution de probabilité

Idéalement, chaque partie de la scène visuelle devrait être traitée du mieux possible. Or, le nombre de neurones simultanément activés dans le cortex et leur taux de décharge ne peuvent excéder un certain seuil en raison du coût énergétique de leur activation (Lennie, 2003). Cette contrainte métabolique restreint le nombre de neurones activés simultanément lors du traitement perceptif de la scène visuelle. Il est alors nécessaire de sélectionner les informations à traiter en priorité pour optimiser les performances des sujets aux tâches qu’ils réalisent. Ainsi, les stimuli simultanément présents sont mis en compétition, fait documenté par de nombreuses études comportementale et de neuro-imagerie (pour une revue, voir D. M. Beck & Kastner, 2009). Lorsque deux stimuli sont perçus simultanément par le sujet, ils induisent une réponse neuronale inférieure à la somme de celles qu’ils auraient déclenché chacun individuellement (Kastner, Weerd, Desimone, & Ungerleider, 1998 ; Reynolds, Chelazzi, & Desimone, 1999). On parle alors d’effet suppressif. L’attention visuelle permet de contrer cet effet à la faveur du stimulus vers lequel elle est orientée : les neurones

TABLEAU 3.1 – *Modèle conceptuel de l'attention visuelle.*

Concepts	Grandeur mathématique
Distribution de l'attention	Distribution de probabilité
Quantité d'attention totale	Facteur $Qa$ modulant l'intégrale de la distribution
Position du focus attentionnel	Moyenne $\mu$ de la distribution attentionnelle
« Taille » du focus attentionnel	Variance $\sigma$ de la distribution attentionnelle
Déplacement de l'attention	Modification de $\mu$ avec une vitesse $d\mu/dt$
Élargissement ou focalisation de l'attention	Modification de $\sigma$ avec une vitesse $d\sigma/dt$ (augmentation pour l'élargissement, diminution pour la focalisation)
Attention « feature-based » ou « object-based »	Proportions $A_1, A_2, \dots$ de l'attention visuelle répartie dans chaque couche de traitement visuel
Attention visuelle	Proportion $A$ de l'attention totale $Ta$ dévouée à la voie visuelle ( $A = Qa/Ta$ )
Flexibilité attentionnelle	Vitesse $dA/dt$ de modification des paramètres de répartition attentionnelle sur les différentes voies sensorielles et dans les différentes couches de traitement

de la région concernée conservent un même niveau d'activation, voire s'activent davantage, ce qui facilite le traitement perceptif (Carrasco, 2011).

L'attention visuelle sera donc envisagée comme une quantité de ressources *limitées, distribuée* dans l'espace, et contrôlée de manière à *sélectionner* les stimuli dont le traitement doit être privilégié. Quelle que soit la forme de la distribution utilisée, nous considérons que la quantité totale de ressources attentionnelles dont dispose le sujet est représentée par *l'intégrale de cette distribution* ; une distribution de probabilité est un objet mathématique adéquat pour décrire cette attention comme une ressource qui se distribue. Ainsi, dans notre modèle conceptuel, une distribution attentionnelle (au sens spatial) est décrite par une distribution de probabilités (au sens mathématique).

Nous modulons l'intégrale de la distribution de probabilité par un paramètre « extérieur » à cette distribution, le paramètre  $Qa$  en imaginant un mécanisme de mise à l'échelle, comme par exemple une re-normalisation. Cela permet de décrire à la fois la distribution attentionnelle (sa forme) mais aussi sa quantité totale (« l'intensité totale » de l'attention visuelle).

### 3.3.2 Compromis taille et quantité de ressources attentionnelles

Pour définir la distribution de l'attention visuelle dans l'espace, en plus de son emplacement il faut connaître la superficie qu'elle couvre, sa résolution et son gradient d'intensité. Plusieurs modèles computationnels rendent compte de la manière dont est traité le signal à l'intérieur et à l'extérieur du focus attentionnel (pour une revue, voir Borji & Itti, 2013 ; Frintrop et al., 2010). Cependant, ces modèles distribuent les ressources attentionnelles de manière binaire, en définissant un comportement à l'intérieur et un autre à l'extérieur du focus attentionnel. Ils se placent ainsi dans la lignée de l'un des plus anciens modèles théoriques de répartition de l'attention sur la scène visuelle : le projecteur attentionnel (*attentional spotlight* ; James, 1890 ; Posner, 1980).

Selon ces modèles, le « projecteur » n'illumine que les informations contenues dans son rayon au détriment des autres ; l'attention à l'intérieur du focus attentionnel est homogène ;

l’attention n’est orientée que vers une destination à la fois et ne se déplace d’un point A à un point B qu’en passant nécessairement par les localisations intermédiaires.

Ce modèle a depuis été remis en cause (Cave & Bichot, 1999) et des variantes ont été proposées, comme le modèle de lentille grossissante (*zoom lens* ; Eriksen & St James, 1986) et de gradient gaussien (Downing & Pinker, 1985). Ces derniers ont avancé l’idée que la distribution de l’attention au sein du focus attentionnel est hétérogène et que la taille de ce focus varie en fonction de la tâche, ce qui va dans le sens des résultats comportementaux que nous allons décrire ici. En effet, la taille de la région vers laquelle l’attention est canalisée peut varier et même s’étendre à la totalité de la scène visuelle (Carrasco, 2011).

Conséquence directe de la limitation des ressources attentionnelles, il existe un compromis entre la taille de la zone couverte par l’attention visuelle et l’amélioration des traitements perceptifs qu’elle induit : plus cette région est étendue, moins l’amélioration des traitements perceptifs causée par l’attention est grande (Castiello & Umiltá, 1990). Ce compromis entre la taille du focus attentionnel et le gain de performance se retrouve quelle que soit la densité d’informations sur la scène visuelle et la variabilité des caractéristiques des stimuli qui s’y trouvent (Castiello & Umiltá, 1990 ; Khan et al., 2016). Par ailleurs, canaliser les ressources attentionnelles vers une région donnée s’accompagne d’une baisse de performances perceptives dans le reste du champ visuel (Pestilli & Carrasco, 2005 ; Smith, Singh, & Greenlee, 2000).

Dans notre modèle conceptuel, nous ferons l’hypothèse que les ressources attentionnelles sont réparties dans l’espace selon une distribution gaussienne 2D. Nous noterons par le paramètre  $\mu$  le centre de la région vers laquelle l’attention est dirigée, et par le paramètre  $\sigma$  la dispersion des ressources attentionnelles autour de ce point.

Notons que nous conservons cette notation par analogie avec le cas mono-dimensionnel, et par simplicité. En effet, mathématiquement, dans le cas 2D, la position d’une gaussienne est décrite par un vecteur moyen  $\vec{\mu} = (\mu_x, \mu_y)$ , et sa dispersion par une matrice de covariance

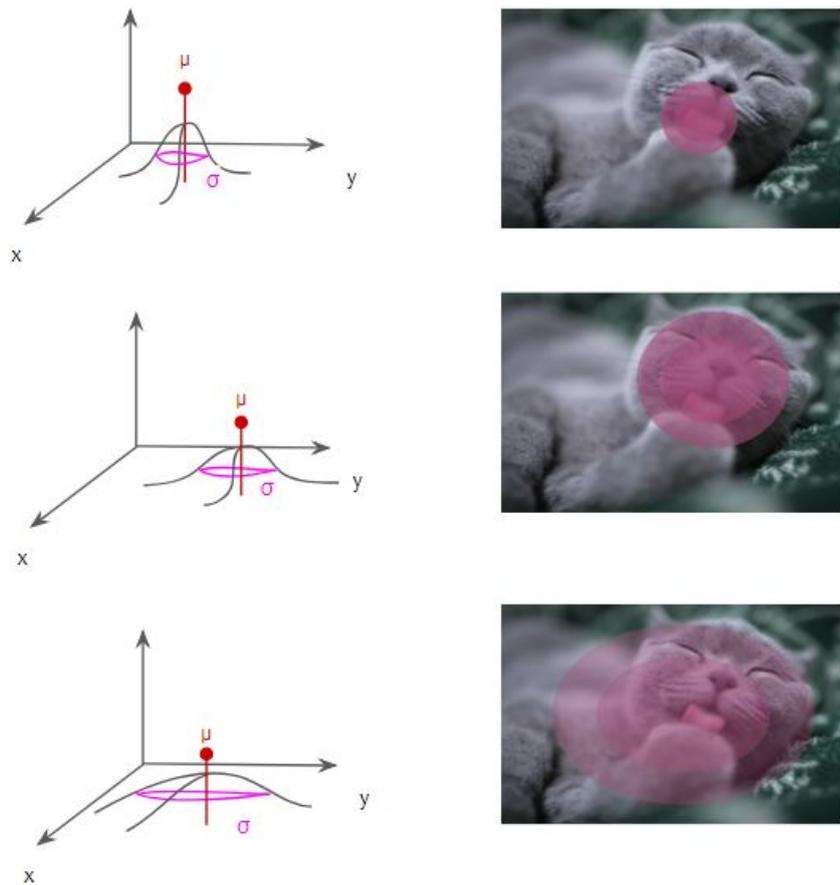
$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \rho\sigma_x\sigma_y \\ \rho\sigma_x\sigma_y & \sigma_y^2 \end{pmatrix} .$$

La « dispersion » totale de cette gaussienne est caractérisée par le déterminant de cette matrice de covariance (que nous notons donc simplement «  $\sigma$  »), et la géométrie de la dispersion, par les relations entre  $\sigma_x$  et  $\sigma_y$  d’une part, et par le paramètre de corrélation  $\rho$  d’autre part (nous ne notons pas mathématiquement ces relations ici, supposant des géométries attentionnelles circulaires).

Ainsi, les régions proches de  $\mu$  reçoivent le plus de ressources attentionnelles et la quantité de ressources décroît au fur et à mesure que l’on s’éloigne de  $\mu$ . Le sujet extrait toujours de l’information des régions les plus périphériques même si elles disposent de peu de ressources attentionnelles (pour une illustration, voir Figure 3.3). Plusieurs études mentionnent la possibilité de diviser son attention visuelle, c’est-à-dire d’allouer simultanément des ressources attentionnelles à deux régions non contiguës. Cette question faisant encore débat (Jans, Peters, & De Weerd, 2010), nous choisissons de nous restreindre à des distributions gaussiennes, donc unimodales, ce qui est à nos yeux le choix le plus parcimonieux.

### 3.3.3 Contrôle des ressources attentionnelles

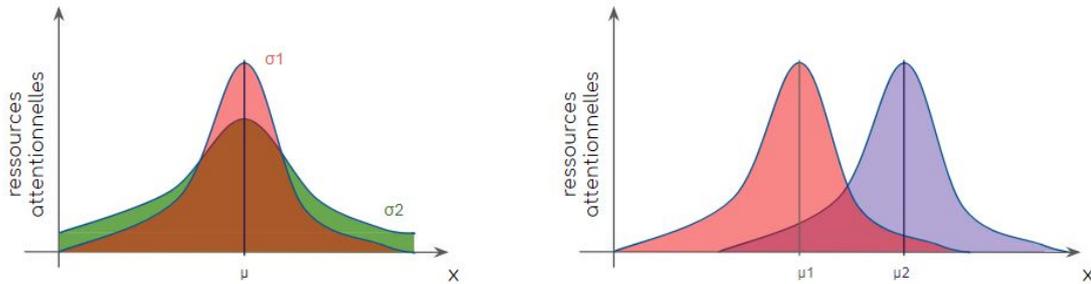
La distribution des ressources attentionnelles peut être modifiée de deux manières : soit par les connaissances, les attentes ou les buts du sujet (attention volontaire, top-down ou endogène), soit par des informations issues de la scène visuelle (attention involontaire, bottom-up, ou exogène) (Desimone & Duncan, 1995).



**FIGURE 3.3** – Illustrations de distributions gaussiennes en fonction de leurs paramètres  $\mu$  et  $\sigma$  (de haut en bas,  $\sigma$  petit, moyen et grand), et leur possible déploiement sur une scène visuelle. À gauche : l'espace visuel est représenté par les dimensions  $x$  et  $y$ , et la valeur de la distribution de probabilité attentionnelle est représentée par la dimension  $z$ . À droite : l'espace visuel est représenté par une image, et la valeur de probabilité par la couleur de la zone colorée.

L'attention *top-down* des sujets et plus particulièrement la difficulté que le sujet attribue à la tâche à effectuer a un impact sur la quantité de ressources mobilisées : plus celle-ci est supposée difficile par le sujet, plus l'activité cérébrale des aires visuelles correspondant à la région où le sujet oriente son attention sera forte (Reynolds & Pasternak, 2000). Allouer plus de ressources attentionnelles au traitement d'un ensemble d'objets s'accompagne d'une réduction de la taille du focus attentionnel (Khan et al., 2016), ce qui revient à diminuer le paramètre  $\sigma$  de la gaussienne (voir Figure 3.4, à droite). Il est intéressant de remarquer que l'allocation de ressources attentionnelles peut avoir lieu en l'absence de stimuli visibles (Kastner, Pinsk, De Weerd, Desimone, & Ungerleider, 1999 ; Luck, Chelazzi, Hillyard, & Desimone, 1997).

L'attention *bottom-up* est modulée par les propriétés visuelles de la scène visuelle et la saillance des objets qui s'y trouvent. Ce sont eux qui « captent » les ressources attentionnelles du sujet, contrairement à l'attention *top-down* qui est sous son contrôle. La saillance peut être définie comme étant le degré de différence entre un objet donné et le reste de la scène en fonction des propriétés visuelles qu'ils partagent (orientation, couleur, direction du



**FIGURE 3.4** – Illustration du contrôle de la distribution attentionnelle : à gauche, modification de la dispersion attentionnelle par modification de  $\sigma$  ; à droite, déplacement de la distribution attentionnelle par modification de  $\mu$ .

mouvement, etc.). Plus un objet est saillant, plus il attirera l’attention et plus la compétition neuronale sera biaisée en sa faveur (Reynolds & Desimone, 2003). Par ailleurs, une canalisation *bottom-up* des ressources attentionnelles peut avoir lieu lorsqu’un item apparaît subitement dans le champ visuel du sujet, attirant son attention dans cette région quelle que soit sa saillance : c’est avec ce type de stimulus que les expériences de Posner orientent l’attention des participants.

Ces deux modes de contrôle, *top-down* et *bottom-up*, des ressources attentionnelles s’incarnent dans des réseaux cérébraux indépendants qui se superposent partiellement (Chica, Bartolomeo, & Lupiáñez, 2013 ; Corbetta & Shulman, 2002 ; Peelen, Heslenfeld, & Theeuwes, 2004 ; Valdois, Lassus-Sangosse, Lallier, Moreaud, & Pisella, 2018). Par ailleurs, si les sujets peuvent orienter et moduler les ressources attentionnelles *top-down* en fonction de la tâche, ils ont du mal à ignorer les indices périphériques non pertinents ou nuisibles à la tâche à résoudre (Muller & Rabbitt, 1989 ; Yeshurun & Carrasco, 2008).

Pour résoudre une tâche donnée, le sujet peut utiliser plusieurs stratégies de répartition de ses ressources attentionnelles. Certaines sont plus efficaces que d’autres : par exemple, pour discriminer un changement d’orientation d’un patch de Gabor de haute fréquence spatiale, il vaut mieux réduire fortement  $\sigma$  autour de la zone où il se trouve. Les sujets peuvent apprendre la stratégie de contrôle de  $\sigma$  la plus appropriée pour résoudre une tâche par exposition répétée (M. R. Beck, Goldstein, van Lamsweerde, & Ericson, 2018)<sup>2</sup>.

Quel que soit le mode de contrôle, un déplacement attentionnel correspond pour nous à une modification du paramètre  $\mu$  (voir Figure 3.4, à droite). Ce déplacement peut s’accompagner d’une saccade oculaire (*overt shift*), ou s’effectuer sans déplacement observable de l’œil (*covert shift*). Lorsque l’attention est déplacée, elle peut soit « sauter » directement de sa position initiale à sa position finale, soit parcourir l’ensemble des points intermédiaires qui les séparent. Pendant une saccade oculaire, un mécanisme d’inhibition transitoire empêche la prise d’information : c’est la suppression saccadique. Pour ce type de déplacement oculaire, il semblerait soit que l’attention visuelle ne parcoure pas les points intermédiaires, soit qu’elle se déplace graduellement mais n’ait pas d’effet, en l’absence d’information sensorielle à traiter. Pour les déplacements attentionnels sans saccades, plusieurs études en neuroimagerie laissent penser que les ressources attentionnelles sont simultanément démobilisée de leur position initiale et engagées à leur nouvelle position (Cave & Bichot, 1999), ce qui suggère plutôt un déplacement discontinu.

2. Un autre paramètre que nous ne mentionneront pas ici faute de données expérimentales relève de la stratégie de sélection d’une valeur de  $\sigma$  pertinente pour la tâche à résoudre.

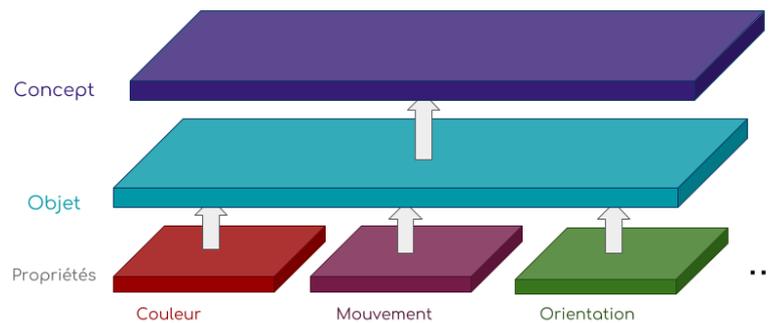
Sans trancher sur la question de la continuité des déplacements attentionnels, nous remarquons que ces déplacements ont une amplitude (la distance entre le point initial et le point final), et s'effectuent en un certain temps. Nous notons donc  $d\mu/dt$  le rapport entre cette amplitude et ce temps, qu'on peut assimiler à la vitesse, avec laquelle le sujet désengage son attention pour la re-mobiliser ailleurs. Le *sluggish attentional shift* constaté chez certains patients dyslexiques (Hari & Renvall, 2001 ; Lallier et al., 2009) pourrait résulter d'une valeur de  $d\mu/dt$  trop faible.

De manière analogue, nous supposons que la dispersion de la distribution attentionnelle peut être contrôlée. Par exemple, augmenter  $\sigma$  augmente la dispersion de l'attention, et donc élargit le champ de focalisation attentionnelle ; à l'inverse, diminuer  $\sigma$  permet de focaliser plus précisément l'attention sur un point donnée. Nous supposons que modifier  $\sigma$  n'est pas instantané, et nous notons donc  $d\sigma/dt$  la vitesse de modification de la dispersion de l'attention. Le paramètre  $\sigma$  pourrait expliquer les résultats comportementaux observés chez les dyslexiques atteints d'un déficit visuo-attentionnel : incapables d'augmenter  $\sigma$  au delà d'un certain seuil, ils ne pourraient élargir la dispersion de l'attention à la totalité du mot. Une autre possibilité est qu'ils puissent élargir suffisamment  $\sigma$ , mais qu'ils aient un  $Qa$  si faible que la quantité d'attention visuelle allouée à chaque lettre soit insuffisante.

### 3.3.4 Niveaux hiérarchiques de l'attention visuelle

Si le sujet peut déplacer son attention dans l'espace, l'attention en général et donc l'attention visuelle peuvent être orientées vers d'autres types d'informations. Plusieurs études montrent que l'attention top-down peut être orientée volontairement vers une caractéristique visuelle particulière (*feature-based* ; Treisman & Gelade, 1980), ou un objet en particulier (*object-based* ; Scholl, 2001). L'orientation sélective de l'attention vers les caractéristiques d'un item se constate dans les tâches de Stroop (voir Section 2.1.1 pour une définition), où le sujet doit orienter volontairement son attention sur la couleur dans laquelle est écrite le mot et non sur les traits qui le composent. Des enregistrements monocellulaires chez le singe ont montré que la réponse neuronale en V4 était biaisée en faveur des stimuli qui correspondent à une indication préalable et ce, même quand le singe n'oriente pas encore son attention dans la portion de l'espace vers laquelle ceux-ci se trouvent (Bichot, Rossi, & Desimone, 2005). Une autre étude chez l'homme a montré que des ressources attentionnelles propres au traitement *feature-based* pouvaient être déployées même en l'absence de stimuli visibles (Serences & Boynton, 2007). Au niveau comportemental, lorsque le sujet oriente son attention vers l'une des propriétés visuelles d'un objet qui est pertinente pour la tâche, cela se traduit par une amélioration de ses performances en tâche de détection (Baldassi & Verghese, 2005 ; Ling, Liu, & Carrasco, 2009 ; Vierck & Miller, 2005). Ces différents niveaux attentionnels sont contrôlés par des circuits neuronaux différents (Doherty, Rao, Mesulam, & Nobre, 2005) et leur effet sur le signal neuronal s'additionne dans l'aire V4 (Hayden & Gallant, 2009).

L'attention *object-based* a, quant à elle, été mise en valeur par des expériences qui présentent deux stimuli différents situés au même emplacement. Par exemple, dans une de ces expériences, on présente un visage et un bâtiment superposés, l'un des deux étant en mouvement, tout en enregistrant l'activité cérébrale des sujets sous IRMf (O'Craven, Downing, & Kanwisher, 1999). Lorsque l'on demande aux sujets d'orienter leur attention vers le visage (respectivement, vers le bâtiment), une plus grande activation est mesurée dans la région du gyrus fusiforme, associé au traitement des visages (respectivement, dans la région du gyrus parahippocampique, associé aux lieux). Ce résultat est corroboré par d'autres études (pour une revue, voir Scholl, 2001), ce qui suggère qu'une sélection attentionnelle peut s'opérer à



**FIGURE 3.5** – Illustration d’une hiérarchie de différents niveaux de représentations visuelles.

un niveau plus abstrait que la caractéristique visuelle. Par ailleurs, l’étude de O’Craven et al. (1999) a montré que si l’objet vers lequel le sujet oriente son attention est en mouvement, les sujets présentent une plus grande activation des aires MT/MT+. Réciproquement, si on lui demande de prêter spécifiquement attention au mouvement de l’objet, on mesure une plus grande activation du gyrus fusiforme si c’est un visage, ou du gyrus parahippocampique si c’est un lieu. Ces derniers points laissent penser qu’il existe une forte interaction entre les ressources attentionnelles correspondant aux traits et celles correspondant aux objets.

En plus de ces différents niveaux de ressources attentionnelles, il semblerait qu’une sélection attentionnelle s’opère aussi au niveau du sulcus intrapariétal, du *frontal eye field* et du colliculus supérieur uniquement en fonction de la pertinence du stimulus par rapport à la tâche à réaliser (Serences & Yantis, 2006), indépendamment des caractéristiques des stimuli considérés. Ce serait un niveau encore plus abstrait de la sélection attentionnelle.

Ces différents niveaux attentionnels peuvent être compris comme modulant l’activité de plusieurs couches de représentations dans une hiérarchie : plusieurs couches *feature-based* dans l’espace 2D du champ visuel (chaque couche correspondant à une propriété visuelle : orientation, couleur, etc.), une couche dans l’espace des objets et enfin une dernière couche abstraite en fonction du « sens » des objets par rapport à la tâche à réaliser (voir Figure 3.5). Une attention uniquement spatiale se traduirait par l’allocation des ressources attentionnelles vers les emplacements d’intérêt sur toutes les couches *feature-based*. Certaines données en imagerie semblent aller dans le sens de cette répartition de l’attention dans différentes couches (Serences & Yantis, 2006 ; Sprague & Serences, 2013).

Nous faisons l’hypothèse que les contributions respectives de ces couches de représentations et de traitements visuels dépendent d’une répartition des ressources attentionnelles au sein de la voie visuelle. Par exemple, si l’essentiel des ressources attentionnelles est allouée au traitement des propriétés des objets, leur configuration spatiale globale sera peu traitée. Cela correspond à une stratégie pour résister à l’effet Stroop, dans laquelle l’attention est contrôlée pour précisément traiter la couleur, au détriment des autres caractéristiques de l’objet visuel (en particulier, les propriétés lexicales). À l’inverse, dans la lecture experte de textes, l’attention est vraisemblablement massivement allouée aux couches lexicales et sémantiques, de sorte que les propriétés visuelles de bas niveau sont peu traitées (et, par exemple, les fautes

de frappes sont difficiles à détecter). Dans notre modèle conceptuel, nous notons  $A_1, A_2, \dots$ , les proportions qui répartissent l'attention visuelle totale entre les différentes couches de traitements et représentations. Ainsi, le paramètre  $Qa$  décrit précédemment peut être modulé par la modification de ces proportions  $A_i$ . Les proportions  $A_i$ , dans leur ensemble, peuvent être vues comme une distribution attentionnelle, au sens mathématique, qui porte non pas sur l'espace visuel 2D mais sur l'espace discret des couches de traitements visuels.

Nous étendons cette notion de répartition attentionnelle au delà de la voie visuelle : nous supposons qu'une ressource attentionnelle totale,  $Ta$ , est répartie et distribuée également dans les différentes voies sensorielles. Ainsi, dans une tâche de répétition vocale (*vocal shadowing*, où le sujet doit répéter ce qu'il entend), l'attention du sujet est essentiellement portée sur les représentations et traitements phonologiques ; dans une tâche de détection visuelle (par exemple, détecter un « p » parmi des « d »), l'attention du sujet est essentiellement portée sur les traitements visuels, indépendamment des sons associés aux lettres ; enfin, dans une tâche de lecture à haute voix, ou de décision lexicale, il y a vraisemblablement une répartition des ressources attentionnelles entre les voies, visuelles et phonologiques.

Dans le modèle conceptuel que nous proposons, nous appelons « attention visuelle » la quantité de l'attention totale allouée aux traitements et aux représentations visuelles. Le paramètre  $Qa$ , est alors considéré comme une proportion de l'attention totale  $Ta$ , ce que nous notons  $A$  :  $A = Qa/Ta$ . Comme précédemment, nous faisons l'hypothèse que ce paramètre  $A$  peut évoluer au cours du temps, par exemple sous le contrôle cognitif (conscient) du sujet. Nous notons  $dA/dt$  la vitesse d'évolution de cette distribution attentionnelle « inter-couches », que nous interprétons comme une « flexibilité attentionnelle ».

Il y a également, dans tous les cas, une partie des ressources allouées aux traitements moteurs et articulatoires pour produire la réponse comportementale. En effet, lorsque l'on a terminé d'identifier un stimulus, les ressources attentionnelles mobilisées sur les représentations avec lesquelles il a été traité sont momentanément indisponibles car elles sont utilisées pour les traitements sémantiques ou moteurs (décision et planification motrice pour répondre à la tâche). Cette moindre disponibilité, temporaire et d'amplitude variable, peut entraîner un blink attentionnel qui ralentit le traitement de stimuli similaires. Il convient de remarquer que les stimuli visuellement différents (par exemple, des visages présentés suite à des chiffres) ne déclenchent pas de blink attentionnel. Cela se traduit par une remise à zéro des couches utilisées pour le traitement du premier stimulus. Cette interprétation du blink attentionnel semble consistante avec des expériences existantes (Awh et al., 2004). Dans notre modèle conceptuel, le paramètre de flexibilité attentionnel  $dA/dt$  module l'effet du blink attentionnel : lorsque  $dA/dt$  est élevé, les ressources attentionnelles sont rapidement ré-allouées et le blink attentionnel est réduit.

## RÉSUMÉ DU CHAPITRE 3

Quels sont les mécanismes en jeu dans l'amélioration conjointe des performances sur les tâches de report et en lecture par l'entraînement de l'attention visuelle ? Ces mécanismes se retrouvent-ils dans des configurations en 2D avec des stimuli non verbaux ? Voici les réponses apportées dans ce chapitre :

- Le modèle de reconnaissance visuelle de mot BRAID propose une description de la capacité de traitement visuel impliquée en lecture. Celle-ci prend la forme d'une distribution de probabilité gaussienne, de variance  $\sigma$  et d'espérance  $\mu$ , dont l'intégrale vaut  $Qa$ .
- $\sigma$  représente la distribution des ressources attentionnelles dans l'espace,  $\mu$  correspond au centre de la région où l'attention est orientée, et  $Qa$  est la quantité totale de ressources attentionnelles.
- Des simulations effectuées avec BRAID ont montré que les performances en tâche de report sont expliquées par les paramètres  $\sigma$  et  $Qa$ .
- BRAID est un modèle limité à une seule dimension horizontale. Or les tâches d'entraînement sont dans l'espace 2D. Il est nécessaire de proposer un cadre mathématiques qui étende les propriétés de BRAID à l'espace 2D et qui soit compatible avec les principaux résultats de la littérature sur l'attention visuelle dans l'analyse de scènes quelconques.
- L'attention visuelle peut être formalisée mathématiquement par un ensemble de cartes hiérarchisées, chaque carte étant une distribution gaussienne. La quantité de ressources attentionnelles disponibles est représentée par l'intégrale sous la courbe  $Qa$ . La variance  $\sigma$  de cette gaussienne 2D décrit la largeur de la zone sur laquelle sont réparties les ressources attentionnelles, le  $\mu$  représentant son centre.

Les grandeurs décrites ici dans notre formalisme mathématique de l'attention visuelle nous permettront de caractériser l'impact de certains entraînements de l'attention visuelle et de choisir ceux qui améliorent  $\sigma$  et  $Qa$ .



# Chapitre 4

## Le jeu vidéo d'action : un candidat idéal pour entraîner les dimensions de l'attention visuelle impliquées en lecture

Au regard du formalisme mathématiques proposé au Chapitre 3, les dimensions de l'attention visuelle impliquées en lecture sont la quantité totale d'attention visuelle disponible et leur dispersion dans l'espace. Pour proposer un entraînement efficace de l'attention visuelle qui ait un impact sur les performances en lecture, notre logiciel doit répondre à deux besoins : d'une part celui d'entraîner efficacement ces dimensions, et d'autre part celui d'être suffisamment engageant pour être utilisé à long terme sans créer de lassitude. En ce sens, les jeux vidéo d'action, dont l'impact sur l'attention visuelle est largement documenté, semblent répondre à ces deux besoins.

En effet, au delà de leur aspect ludique, les jeux vidéo d'action font l'objet d'études scientifiques depuis plusieurs décennies : ils sont soumis à une définition précise et sont étudiés avec des méthodes scientifiques rigoureuses. Grâce à cette rigueur, leurs effets sur la cognition en général et l'attention visuelle en particulier sont très étudiés, mais restent mal compris. Pour interpréter ces résultats dans un cadre unifié et comprendre le lien entre lecture et jeu d'action, nous utiliserons la description mathématique de l'attention visuelle proposée précédemment. En plus de structurer les résultats obtenus sur l'entraînement de l'attention visuelle par les jeux vidéo d'action, elle permettra de clarifier l'interprétation de l'effet des jeux vidéo d'action sur les capacités de lecture. Ces différents points constitueront la trame de ce chapitre.

### 4.1 Les jeux vidéo d'action comme objet d'étude scientifique

Malgré le traitement médiatique très polarisé dont ils font l'objet, les jeux vidéo d'action sont devenus un véritable sujet d'étude scientifique. Ils suscitent un intérêt croissant dans la communauté scientifique comme en atteste l'évolution du nombre de publications depuis les années 1980 (voir Figure 4.1). Comme tout objet d'étude, les recherches autour du jeu vidéo d'action nécessitent deux ingrédients : la première, une définition claire ce qu'est un jeu vidéo d'action et la seconde, une méthodologie d'étude appropriée.



**FIGURE 4.1** – Évolution du nombre de publications scientifiques avec les mots clefs « action video game », de 1980 à nos jours. Publications référencées par Dimensions (voir <https://www.dimensions.ai>). Ces résultats sont à relativiser au regard de l’augmentation générale du nombre de publications, tous sujets confondus.

#### 4.1.1 Définition d’un jeu vidéo d’action

Les jeux vidéo sont devenus un média à part entière, caractérisé par une grande richesse et diversité de styles d’expériences audiovisuelles et interactives. Cette diversité implique que le terme « jeu vidéo » recouvre une trop grande variété d’objets pour être scientifiquement pertinent. Dans ce document, nous nous intéresserons plus particulièrement aux jeux vidéo « d’action », suivant la définition scientifique proposée initialement par Green et Bavelier (2003), qui a ensuite été actualisée au regard des données accumulées sur une quinzaine d’années de recherches (Bediou et al., 2017). Selon cette définition, les jeux vidéo d’action se distinguent des autres genres de jeux vidéo par 4 propriétés.

- **Imprévisibilité spatiale et temporelle** : les moments et les lieux où vont se dérouler les événements contenus dans le jeu sont peu prévisibles. Par exemple, si le jeu consiste à déplacer un personnage pour trouver et tirer sur des ennemis, le joueur ne peut prévoir à l’avance où et quand les ennemis apparaîtront dans le décor (voir Figure 4.2.A). Ne pouvant anticiper qu’avec imprécision ce à quoi il va faire face, il devra essentiellement compter sur son traitement perceptif en temps réel de la scène visuelle pour planifier une action appropriée.
- **Haute vitesse et fortes contraintes temporelles** : les événements contenus dans le jeu se déroulent rapidement et s’enchaînent à un rythme soutenu. Le joueur doit ainsi réagir rapidement pour réussir le jeu. Par exemple, dans un jeu où le but est de déplacer un vaisseau dans un ensemble de couloirs pour attraper des blocs, la brièveté du moment où on peut les attraper, et la succession très rapide des blocs (voir Figure 4.2.B). impose des contraintes fortes sur les stratégies d’exploration oculaires et attentionnelles de la scène visuelle, pour qu’elles soient efficaces.
- **Alternance entre les modes d’analyse de la scène visuelle** : l’ensemble des étapes que doit réaliser le joueur pour réussir un jeu vidéo d’action impose au joueur d’alterner une supervision globale de la scène et une focalisation sur une de ses sous-parties. Par exemple, dans un jeu de tir de type *shoot-them-up* (voir Figure 4.2.C), le joueur doit à la fois superviser les bords de l’écran où arrivent de nouveaux éléments à éliminer tout en analysant finement la zone où se trouve son vaisseau pour éviter les tirs ennemis. Pour pouvoir analyser visuellement tous les éléments nécessaires pour remporter la victoire, le joueur doit être capable de passer rapidement entre ces deux modes de gestion des ressources attentionnelles.



**FIGURE 4.2** – Quatre exemples de jeux vidéo d'action : A : *Call of Duty Modern Warfare 2* (Infinity Ward, 2009) ; B : *Audiosurf* (Invisible Handlebar, 2008) ; C : *Xydonia* (Breaking Bytes, 2015) ; D : *Starcraft 2* (Blizzard Entertainment, 2010).

- **Charge cognitive, perceptive et motrice** : dans un jeu vidéo d'action, les événements à traiter sont nombreux, les tâches à réaliser multiples et les gestes à planifier précis. Par exemple, le joueur doit analyser un grand nombre d'éléments visuels pour connaître le statut de la bataille, doit superviser les actions de plusieurs groupes de combattants et doit les commander grâce à des combinaisons de touches rapides (voir Figure 4.2.D). La multiplication des contraintes perceptives et motrices imposées au joueur exige de lui une gestion précise de ses ressources attentionnelles pour pouvoir analyser efficacement la scène visuelle.

Ainsi, cette définition scientifique du terme « jeux vidéo d'action », que nous accepterons par la suite, désigne un ensemble de jeux dont l'aspect et les mécanismes peuvent être très différents. Cette définition scientifique correspond de manière approximative à la définition du même terme employée par le grand public ou la presse spécialisée dans le jeu vidéo. Une différence notable, cependant, concerne la présence de situations ou de mise en scènes violentes ; alors que le grand public conçoit habituellement les jeux vidéo d'action comme des jeux « violents », cela n'est absolument pas inclus dans la définition scientifique. Ainsi, beaucoup de jeux d'actions, selon nos critères, ne sont pas violents (voir par exemple le jeu « Rayman et les Lapins Crétins », Ubisoft, 2006) et, à l'inverse, il existe beaucoup de jeux violents qui ne satisfont pas les critères des jeux d'action (voir par exemple « Saw », Konami, 2009).

### 4.1.2 Méthodologie

Les études sur les effets des jeux vidéo sont de deux types :

- des études transversales qui comparent joueurs et non-joueurs appariés sur plusieurs critères (âge, genre, niveau académique, etc.),

- des études interventionnelles sur des non-joueurs dont la moitié a été entraînée à des jeux vidéo d'action et l'autre moitié à des jeux contrôlés.

Dans la plupart des études, les sujets sont considérés comme des joueurs de jeux vidéo d'action à partir du moment où ils cumulent au moins 3 heures de pratique de jeux vidéo d'action par semaine depuis 6 mois. Certaines études ont cependant des critères plus sévères et requièrent une pratique d'au moins 5 heures par semaine durant les 6 derniers mois. Pour limiter les effets d'un biais de sélection qui entraînerait une différence de performances entre joueurs et non-joueurs, les premiers se sentant plus valorisés que les seconds, plusieurs études transversales mentionnent que les participants doivent idéalement être recrutés sans préciser que c'est leur pratique des jeux vidéo d'action qui sera étudiée. Pourvu que le jeu contrôlé soit aussi engageant et déclenche des réactions physiologiques de même ampleur chez le joueur, ce sont surtout les études interventionnelles qui suggèrent un lien causal entre la pratique du jeu d'action et la modification des performances des joueurs sur une ou plusieurs dimensions cognitives. Les jeux vidéo d'action modifient la physiologie des joueurs immédiatement après une session de jeu, ce qui a un impact à court terme sur les performances cognitives (Kozhevnikov, Li, Wong, Obana, & Amihai, 2018). Ainsi, quel que soit le type d'étude concerné, les performances des joueurs doivent être mesurées plusieurs heures après la fin de la dernière séance de jeu pour ne pas être affectées par ce changement physiologique momentané.

### 4.1.3 Variété des effets de la pratique des jeux vidéo d'action

Dans une récente méta-analyse, Bediou et al. (2017) font le bilan des études sur l'impact des jeux vidéo d'action publiées entre 2000 et 2015. Ils séparent 6 domaines que la pratique des jeux vidéo d'action améliorent :

- l'attention visuelle,
- la cognition verbale,
- la perception,
- l'inhibition,
- la flexibilité cognitive,
- la cognition spatiale.

Nous nous focaliserons plus spécifiquement sur les trois premiers domaines cités précédemment, dans la mesure où leur implication dans le processus de lecture est largement reconnue. La cognition spatiale peut aussi être mise en jeu en lecture, si on y inclut la représentation de la position de la feuille dans l'espace, ou si la phrase qu'on lit décrit un lieu ou un déplacement. Cependant, ces points sont hors de notre périmètre d'intérêt. Par ailleurs, la séparation entre « perception visuelle » et « attention visuelle » est nécessairement arbitraire, étant donné l'intrication étroite de ces deux processus (Gilbert & Li, 2013 ; Serences & Yantis, 2006).

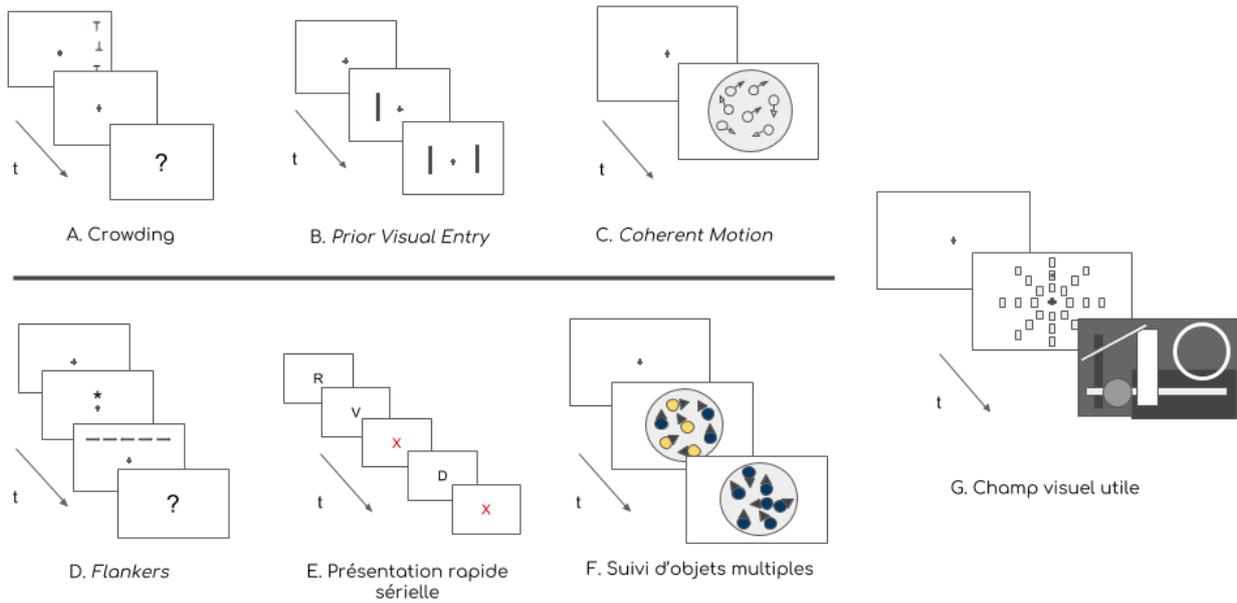
Selon nous, seules trois études répertoriées dans la méta-analyse de Bediou et al. (2017) rendent compte des effets des jeux vidéo d'action dans des conditions de traitement visuel de bas niveau où la contribution de l'attention est minime. Une première étude montre que les joueurs de jeux vidéo d'action ont un seuil de détection des contrastes plus bas que les non-joueurs (Li, Polat, Makous, & Bavelier, 2009). Une deuxième étude conclut que les aires de Goldmann des joueurs (i.e. la zone de leur champs visuel dans laquelle ils détectent l'apparition de stimuli brefs et d'une luminosité donnée) sont plus étendues : ils perçoivent mieux la luminosité dans des régions plus excentrées de leur champ visuel que les non-joueurs (Buckley, Codina, Bhardwaj, & Pascalis, 2010)). Enfin, une troisième étude suggère que la pratique des jeux vidéo d'action permet à des non-joueurs amblyopes d'améliorer leur sté-

réoscopie, c’est-à-dire leur vision en trois dimensions (Li, Ngo, Nguyen, & Levi, 2011). Pour autant, l’influence de l’attention visuelle reste toujours présente dans les tâches mentionnées précédemment : des études ont montré une amélioration de l’activité cérébrale dans V3a (Kastner et al., 1998) et V1 (Kastner et al., 1999) pour les champs récepteurs vers lesquels l’attention était orientée pour des tâches de nature similaire. Concernant la cognition verbale, il faut savoir que les études mentionnées dans la méta-analyse de Bediou et al. (2017) portent surtout sur le processus de lecture. Nous défendrons dans la section 4.3 le fait que cette amélioration du processus de lecture puisse être la conséquence de l’entraînement de processus attentionnels par les jeux vidéo d’action.

## 4.2 Effet des jeux vidéo d’action sur les ressources attentionnelles

La pratique des jeux vidéo d’action a un effet positif sur une grande variété de tâches impliquant l’attention visuelle. Les joueurs de jeux vidéo d’action et les non-joueurs qui y ont été spécifiquement entraînés sont meilleurs que ceux qui n’y jouent pas aux tâches suivantes :

- tâche de « d’encombrement visuel » (*crowding*, Green & Bavelier, 2007), c’est-à-dire une tâche d’identification visuelle où les items sont proches et génèrent des effets de *crowding* (voir Figure 4.3.A),
- tâche de jugement d’ordre (West, Stevens, & Pratt, 2008), où deux stimuli apparaissent successivement et le sujet doit indiquer lequel est apparu en premier (voir Figure 4.3.B),
- tâche de « déplacement cohérent » (*coherent motion*, Pavan, Boyce, & Ghin, 2016) où le sujet doit discriminer la direction du mouvement emprunté par une proportion variable de cibles, les autres se déplaçant de façon aléatoire (voir Figure 4.3.C),
- tâche de « flankers » (Wilms, Petersen, & Vangkilde, 2013) où une série de stimuli apparaissent horizontalement les uns à côté des autres, le sujet devant discriminer l’orientation du stimulus central qui peut être soit identique aux autres, soit différent, et qui peut être précédé ou non d’un indice spatial (voir Figure 4.3.D),
- présentation rapide sérielle (Green & Bavelier, 2003), tâche où les items sont présentés rapidement les uns à la suite des autres et où la reconnaissance d’une cible d’intérêt entraîne une période « réfractaire » pendant laquelle il est impossible pour le sujet d’identifier consciemment la ou les cible-s qui la suivent immédiatement (voir Figure 4.3.E),
- tâche de saccade oculaire vers une cible avec apparition de distracteurs (Chisholm & Kingstone, 2012),
- recherche visuelle (Castel, Pratt, & Drummond, 2005 ; Hubert-Wallander, Green, Sugarman, & Bavelier, 2011), où le sujet doit rechercher une cible parmi un ensemble de distracteurs visuellement similaires,
- suivi d’objets multiples (Green & Bavelier, 2006), où plusieurs objets sont en mouvement dont un certain nombre a une couleur différente des autres et sont les cibles d’intérêt du sujet. Au bout d’un certain temps, les cibles prennent la même couleur que les autres et continuent leur déplacement. Quelques secondes plus tard, tous les objets s’arrêtent et le sujet doit indiquer la position des cibles d’intérêt (voir Figure 4.3.F) ;
- tâche de champ visuel utile (ou *useful field of view* ; Green & Bavelier, 2003), où le sujet doit détecter un stimulus pouvant apparaître à l’une des 24 positions prédéfinies



**FIGURE 4.3** – Illustration de certains protocoles utilisés pour comparer joueurs de jeux vidéo d'action et non-joueurs.

dans l'espace (voir Figure 4.3.B).

Ces tâches sont décrites à la Figure 4.3. Ces différents résultats montrent que la pratique des jeux vidéo d'action améliore la résolution spatiale du traitement des items visuels. C'est ce que suggèrent plus particulièrement les performances supérieures des joueurs et non-joueurs entraînés aux jeux vidéo d'action sur les tâches de crowding et de champ visuel utile, tâches considérées comme une mesure de la résolution spatiale de l'attention (Ball, Beard, Roenker, Miller, & Griggs, 1988 ; Intriligator & Cavanagh, 2001). La vitesse de traitement de la scène visuelle semble aussi être améliorée par la pratique des jeux vidéo d'action : les joueurs montrent des temps de réaction plus courts que les non-joueurs sans augmentation du nombre d'erreurs (Dye, Green, & Bavelier, 2009) et sont plus sensibles à la *Prior Visual Entry* (voir 3.1 (West et al., 2008)). Par ailleurs, les joueurs de jeux vidéo d'action ont besoin de moins de temps de présentation pour résoudre une tâche de détection de changement (Boot, Kramer, Simons, Fabiani, & Gratton, 2008 ; Clark, Fleck, & Mitroff, 2011).

Comment expliquer ces résultats au regard de notre description de l'attention visuelle, proposée dans le chapitre 3 ? Nous envisageons ci-dessous trois sources possibles d'amélioration du système : 1) la vitesse de déplacement des ressources attentionnelles  $d\mu/dt$  augmente, 2) la gestion des ressources attentionnelles inter-couches  $dA/dt$  est meilleure, et enfin, 3) la quantité de ressources attentionnelles ( $Qa$  augmente et/ou le contrôle de leur répartition dans l'espace est meilleur (agrandissement de la zone vers laquelle peut être distribuée l'attention  $\sigma$ , meilleure gestion des ressources intra-couche  $d\sigma/dt$ ).

#### 4.2.1 Une vitesse de déplacement des ressources attentionnelles inchangée

Il semblerait d'abord que la pratique des jeux vidéo d'action n'améliore pas la vitesse de déplacement de l'attention visuelle  $d\mu/dt$ . En effet même si, sur les tâches de Posner,

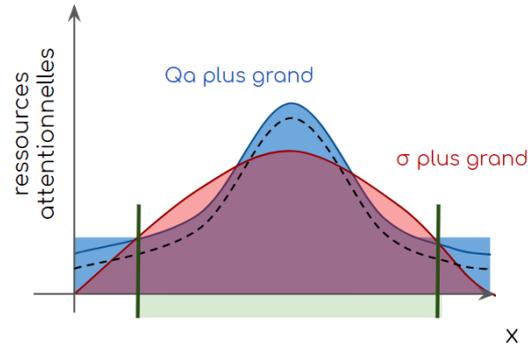
les joueurs de jeux vidéo ont des temps de réaction plus courts que les non-joueurs, l’écart entre le temps de réaction des essais non valides et celui des essais valides est similaire pour les deux groupes, ce qui suggère que l’un et l’autre groupe déplacent leur attention à la même vitesse (Hubert-Wallander et al., 2011). Joueurs et non-joueurs ont aussi une dynamique d’inhibition de retour similaire (Castel et al., 2005). L’inhibition de retour est un mécanisme incontrôlable qui empêche les déplacements oculaires et attentionnels vers une zone où l’attention a été récemment orientée. Dans ces tâches, les cibles peuvent apparaître à deux emplacements, et sont précédées par un indice. Lorsque cet indice apparaît au plus 200 ms avant la cible, il facilite la détection de la cible à son emplacement. Au-delà de cette durée, l’indice facilite la détection de la cible si elle apparaît à l’autre emplacement. Cette facilitation après 200 ms révèle l’inhibition de retour. Une étude de Castel et al. (2005) qui s’est intéressée à l’inhibition de retour chez les joueurs et non-joueurs de jeux vidéo d’action dans une tâche de Posner n’a pas montré non plus de différence entre les deux groupes. Par ailleurs, dans d’autres tâches qui demandent aux sujets de faire une saccade vers une cible qui apparaît en même temps qu’un distracteur saillant, il n’y a de différence entre joueurs et non-joueurs ni sur le temps d’initiation de la saccade, ni sur la durée de fixation du distracteur lors de saccades vers celui-ci (Chisholm & Kingstone, 2012).

#### 4.2.2 Une meilleure gestion des ressources attentionnelles entre les niveaux hiérarchiques

Concernant la gestion des ressources attentionnelles, une étude a comparé le blink attentionnel de joueurs et de non-joueurs (Green & Bavelier, 2003). Les joueurs ont de meilleures performances que les non-joueurs quand le deuxième stimulus apparaît au plus 500 ms après le premier (500 ms correspondent à la part incompressible du blink attentionnel). Pour des écarts de temps plus élevés, les performances entre les deux groupes deviennent similaires. Ces effets ont été reproduits dans des études où des non-joueurs étaient entraînés aux jeux vidéo d’action : ils sont parvenus au taux de détection attendu sur la seconde cible pour des écarts de temps moindre que chez les non-joueurs (clignement attentionnel réduit) et leur capacité de détection était meilleure pour tous les écarts de temps. Cela laisse penser que la pratique des jeux vidéo d’action augmente la vitesse  $dA/dt$  de l’allocation des ressources attentionnelles aux différentes couches de traitement perceptifs, ce qui diminue le temps pour qu’elles deviennent à nouveau disponibles à une couche donnée.

#### 4.2.3 Des ressources attentionnelles disponibles en plus grande quantité et/ou un meilleur contrôle de leur répartition dans l’espace

Plusieurs éléments laissent penser que la pratique des jeux vidéo d’action induit soit une augmentation de la quantité des ressources attentionnelle  $Qa$ , soit une capacité à mieux ajuster l’étendue  $\sigma$  de leur distribution. Les joueurs de jeux d’action ont de meilleures performances en recherche visuelle, qu’elle soit sérielle (la cible est visuellement similaire aux distracteurs) (Hubert-Wallander et al., 2011) ou en condition *pop-out* (la cible est très saillante par rapport aux distracteurs) (Bavelier, Achtman, Mani, & Föcker, 2012). En recherche visuelle sérielle, où le temps de réaction augmente avec le nombre d’items en présence, les joueurs de jeux d’action sont moins affectés par l’augmentation du nombre d’items (Hubert-Wallander et al., 2011). Sachant que dans ce type de tâches, les joueurs de jeux d’action font un nombre de saccades et de fixations identiques à ceux des non-joueurs et ont une



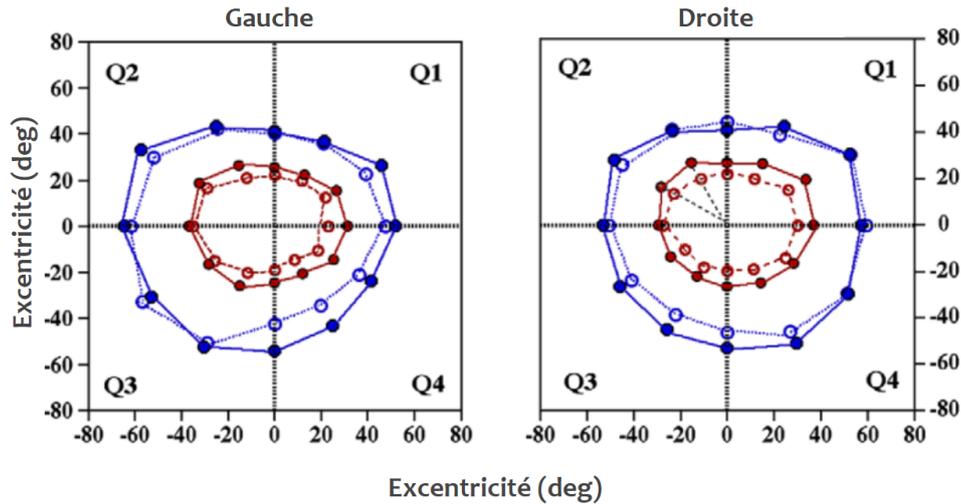
**FIGURE 4.4** – Illustration au cas 1D de l'équivalence mathématique entre augmentation de la quantité de ressources attentionnelles et répartition plus étendues des ressources dans l'espace. La zone qui nécessite un traitement visuel est la zone verte. La courbe en pointillé indique une distribution attentionnelle de référence. La courbe rouge a les mêmes paramètres que la courbe en pointillé, hormis un  $\sigma$  plus grand. La courbe bleue a les mêmes paramètres que la courbe en pointillé, hormis  $Qa$  plus grand. L'intégrale des deux courbes calculée sur la zone verte est égale.

distribution similaire de l'attention dans l'espace (Azizi, Abel, & Stainer, 2016), cela laisse penser que leur prise d'information est plus efficace. Cette meilleure prise d'information se retrouve aussi en tâche de *coherent motion* (uniquement en présentation parafovéale, Pavan et al., 2016), en tâche de suivi d'objets multiples (Green & Bavelier, 2006) et en tâche de détection de changement (Boot et al., 2008 ; Colzato, van den Wildenberg, Zmigrod, & Hommel, 2013). Dans ces tâches, les joueurs de jeux d'action montrent des performances supérieures à celles des non-joueurs.

Par ailleurs, les joueurs de jeux vidéo d'action font moins de saccades vers le distracteur dans une tâche où ils doivent faire une saccade vers un stimulus qui apparaît en même temps qu'un distracteur plus saillant (Chisholm & Kingstone, 2012). Leurs ressources attentionnelles, soit parce qu'elles sont présentes en plus grande quantité, soit parce que mieux réparties, leur permettent d'améliorer la « force » de la représentation de la cible de manière à compenser celle du distracteur.

Une étude a modélisé les performances des joueurs de jeux d'action dans le cadre de la Théorie de l'Attention Visuelle de Bundesen et al. (2005) (Wilms et al., 2013). Joueurs et non-joueurs ont passé les test de combiTVA, utilisés pour modéliser la capacité de traitement visuel et la capacité de stockage. Les joueurs de jeux vidéo d'action montrent une capacité de traitement visuelle plus grande que celles des non-joueurs. Celle-ci est corrélée avec le nombre d'heures passées à jouer. Comme les performances en tâches de report (voir Section 3.2.2), ces différents résultats peuvent être aussi expliqués par des ressources attentionnelles plus largement réparties dans l'espace (augmentation de  $\sigma$ ) ou présentes en plus grande quantité (augmentation de  $Qa$ ). En effet, les conditions dans lesquelles ces résultats ont été obtenus ne contrôlaient pas la taille de la zone vers laquelle l'attention devait être répartie pour résoudre la tâche : ces deux possibilités sont donc mathématiquement indistinguables dans ces conditions (voir Figure 4.4).

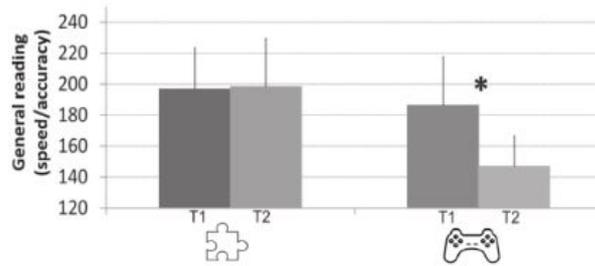
Une seule étude de neuro-imagerie a été menée dans le but d'explorer une éventuelle différence entre l'activité électrophysiologique des joueurs et des non joueurs de jeux d'action (Mishra, Zinni, Bavelier, & Hillyard, 2011). Une tâche particulièrement consommatrice de



**FIGURE 4.5** – *Emplacement moyen auquel la cible lumineuse a été détectée pour l'œil gauche et l'œil droit. Les traits rouges correspondent au champ visuel central, les traits bleus au champ visuel périphérique. Les cercles pleins correspondent aux performances des joueurs de jeux vidéo d'action, les cercles vides aux performances des non-joueurs. Tiré de (Buckley et al., 2010).*

ressources attentionnelles a été proposée aux participants : ils devaient détecter l'apparition d'une lettre dans 3 flux ininterrompus de lettres, positionnés simultanément à 3 emplacements différents de l'écran. Les résultats montrent que les joueurs de jeux vidéo d'action ont une amplitude réduite de l'activité électrique dans les zones vers lesquelles ils n'orientent pas leur attention. Cette plus grande suppression des distracteurs laisse penser qu'ils ont un  $\sigma$  plus petit et donc un meilleur contrôle de la répartition de leurs ressources attentionnelles en fonction des exigences de la tâche à résoudre. Par ailleurs, des études ont comparé les aires de Goldman des joueurs et non-joueurs. Dans ces études, on présente des points lumineux dans les régions visuelles périphériques, et l'emplacement d'apparition des points n'est pas prévisible (Buckley et al., 2010). Pour réaliser cette tâche, une stratégie est de répartir les ressources attentionnelles le plus largement possible sur l'écran, ce qui revient à les distribuer uniformément sur une grande partie de la scène visuelle. Dans ces conditions là,  $\sigma$  doit être le plus large possible et seule compte la quantité totale d'attention visuelle  $Qa$  semble être impliquée. Les joueurs de jeux vidéo d'action ont des performances supérieures aux non-joueurs dans des régions plus périphériques (voir Figure 4.5), ce qui laisse penser qu'ils y ont alloué plus de ressources attentionnelles que les non-joueurs, et qu'ils auraient donc une quantité de ressources attentionnelles supérieure à celle des non-joueurs. Cependant la simplicité des stimuli utilisés ne nous permet pas d'exclure avec certitude l'implication de  $\sigma$ . Pour voir la contribution respective de  $Qa$  et  $\sigma$ , il serait intéressant de demander au sujet, non plus de simplement détecter le stimulus présenté, mais de l'identifier.

Les joueurs de jeux vidéo d'action pourraient donc à la fois avoir des ressources attentionnelles  $Qa$  disponibles en plus grande quantité pour les traitements visuels, et un meilleur contrôle de leur répartition  $\sigma$  dans l'espace. Ces deux mécanismes sont compatibles avec ceux dont l'implication en lecture est décrite par notre pseudo-modèle de l'attention visuelle (voir Chapitre 3), ce qui laisse penser que leur amélioration pourrait induire une amélioration des capacités de lecture.



**FIGURE 4.6** – Performances aux tâches de lecture avant et après entraînement aux jeux vidéo d’action. En abscisse se trouvent les conditions expérimentales de l’étude : la pièce de puzzle indique le groupe entraîné au jeu contrôlé, la manette au jeu d’action ; T1 indique une mesure pré-entraînement, T2 une mesure post-entraînement. En ordonnée se trouvent le ratio vitesse/précision en tâche de lecture. Seul le groupe entraîné au mini-jeu d’action a amélioré ses performances après entraînement. Tiré de (Franceschini et al., 2013)

### 4.3 L’effet de la pratique des jeux vidéo d’action sur les performances en lecture : conséquence de meilleures capacités attentionnelles ?

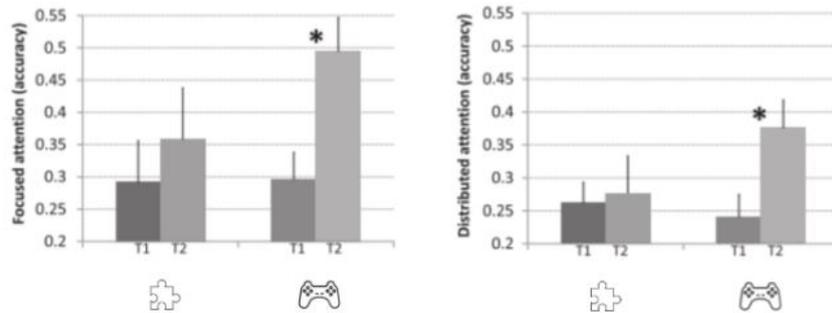
L’effet des jeux vidéo d’action sur l’attention visuelle semble concerner à la fois l’étendue  $\sigma$  de la distribution des ressources attentionnelles dans l’espace et leur quantité totale  $Qa$ . Les mécanismes améliorés semblent être ceux dont le rôle en lecture est identifié dans notre pseudo-modèle (voir Chapitre 3). Quelques études montrent un effet des jeux vidéo d’action sur les performances en lecture chez des enfants dyslexiques : il reste à savoir si les mécanismes attentionnels impliqués sont bien les mêmes.

#### 4.3.1 Résultats comportementaux en faveur d’un lien entre pratique des jeux vidéo d’action et performances en lecture

La méta-analyse de Bediou et al. (2017) fait mention de l’effet des jeux vidéo d’action sur la cognition verbale. Les études principales référencées dans cette catégorie portent plus précisément sur les performances en lecture (Franceschini et al., 2013, 2017). Elles mentionnent l’effet positif sur la lecture d’un entraînement aux jeux vidéo d’action chez des enfants dyslexiques.

A priori, les liens entre jeux vidéos d’action et lecture pourraient sembler ténus. Leurs propriétés visuelles diffèrent fortement : des stimuli variés et interactifs, en mouvement permanent pour les premiers, des items visuellement similaires et fixes pour les seconds. Une étude remet en cause ce préjugé : Franceschini et al. (2013) ont fait jouer 20 enfants dyslexiques de langue maternelle italienne à des mini-jeux tirés de *Rayman et les lapins crétiens* (Ubisoft, France). Pendant 12 heures, la moitié des enfants a joué à des mini-jeux d’action, et l’autre moitié à des jeux qui n’en étaient pas (jeux de mémoire, puzzles, etc.). Avant et après l’entraînement, les expérimentateurs ont mesuré la vitesse et la précision des sujets pour des tâches de lecture de mots et de pseudo-mots.

Au terme de l’entraînement, seul le groupe « action » a significativement amélioré ses performances en lecture pour les mots et les pseudo-mots (voir Figure 4.6). En regardant le détail des scores, il s’avère que les enfants de ce groupe ont accéléré leur vitesse de lecture sans augmenter le nombre d’erreurs : l’augmentation du ratio vitesse/précision ne résulte



**FIGURE 4.7** – Performances aux tâches d'attention visuelle des participants avant et après entraînement aux jeux vidéo d'action. En abscisse se trouvent les conditions expérimentales de l'étude : la pièce de puzzle indique le groupe entraîné au jeu contrôle, la manette au jeu d'action ; T1 indique une mesure pré-entraînement, T2 une mesure post-entraînement. En ordonnée se trouvent : à gauche, les performances en tâche d'attention localisée, à droite, les performances en tâche d'attention distribuée. Dans les deux tâches, seuls les sujets entraînés au jeu d'action se sont améliorés. Tiré de (Franceschini et al., 2013).

donc pas d'un compromis entre ces deux dimensions mais bien d'une véritable amélioration des performances en lecture. L'amélioration de la vitesse de lecture (0,39 syllabe/seconde) est d'ailleurs du même ordre que celle obtenue par une méthode d'entraînement aux correspondances graphème/phonème utilisée dans le cadre d'une remédiation "classique" de la dyslexie (Tressoldi, Lorusso, Brenbati, & Donini, 2007). Ces résultats sont d'autant plus surprenants que les jeux d'action utilisés n'ont pas été développés pour remédier aux troubles dyslexiques.

Dans l'étude de Franceschini et al. (2013), les expérimentateurs ont aussi mesuré l'attention spatiale des enfants. Pour cela, les participants ont réalisé une variante des tâches de report partiel sur des séquences de 8 pseudo-lettres de couleur rouge présentées pendant 100 ms. Un astérisque apparaissait avant (condition « indicée » ou « attention localisée » selon les auteurs) ou après (condition « non indicée » ou « attention distribuée » selon les auteurs) la séquence de pseudo-lettres pour indiquer la position de la cible à identifier. Dans la condition « attention localisée », l'enfant connaît la position de la pseudo-lettre qu'il devra identifier et peut diriger ses ressources attentionnelles vers celle-ci avant son apparition. Dans la condition « attention distribuée », l'enfant n'a pas d'information a priori sur la position de la pseudo-lettre à identifier et doit donc distribuer son attention sur la totalité de la chaîne de pseudo-lettres. Suite à la présentation de la séquence et de l'indice (pré ou post), l'enfant devait identifier la pseudo-lettre cible parmi des distracteurs. Bien que l'hétérogénéité des dyslexies n'ait pas été prise en compte, les enfants entraînés aux mini-jeux d'action ont montré des performances supérieures à celles des enfants entraînés aux mini-jeux contrôles (voir Figure 4.7). La durée de présentation de la tâche empêchant la réalisation d'une saccade avec reprise d'information, cela suggère une amélioration soit de la quantité  $Qa$  des ressources attentionnelles disponibles, soit d'un meilleur ajustement de  $\sigma$  dans l'espace, ce qui correspond aux effets des jeux vidéo d'action sur l'attention visuelle en général (voir section 4.2). Cependant, il faut remarquer que la tâche d'attention distribuée, où il faut traiter une séquence de pseudo-lettres dont on n'est pas lecteur, est particulièrement difficile (Pelli et al., 2006).

Les auteurs ont adjoint une tâche supplémentaire de détection visuelle de cible pour laquelle l'enfant devait indiquer le plus rapidement possible de quel côté de l'écran celle-ci

apparaissait. La présentation de la cible visuelle était précédée d'un indice sonore, joué dans l'écouteur gauche ou droit du casque d'écoute, ou dans les deux oreilles. L'indice sonore et le côté de l'écran où apparaissait la cible visuelle pouvaient être soit congruents, soit non-congruents. Selon les auteurs, cette tâche mobilise l'attention temporelle inter-modale des enfants c'est-à-dire la fréquence temporelle à laquelle ils extraient des informations dans la scène visuelle et auditive. Les enfants du groupe « action » ont significativement progressé à la tâche de détection quelle que soit la condition dans laquelle celle-ci se déroulait. Les auteurs interprètent cela comme **une meilleure orientation de l'attention**. Or ils n'ont pas mesuré la différence entre les temps de réaction où l'indice et la cible étaient concordants et ceux où ils étaient neutres. Cette différence correspond à la capacité des sujets à bénéficier de l'indice et à orienter leur attention plus rapidement. Sans cette information, les résultats obtenus à cette tâche peuvent aussi bien s'expliquer par une **augmentation des ressources attentionnelles ou une meilleure allocation de celles-ci**.

Ces résultats ont été obtenus chez des enfants de langue maternelle italienne ; or, en italien, les correspondances graphèmes-phonèmes sont extrêmement consistantes. Pour approfondir ce résultat, une deuxième étude a été menée par Franceschini et al. (2017) sur des enfants dyslexiques de langue maternelle anglaise, langue dont l'orthographe est particulièrement opaque.

Les auteurs ont repris le protocole de leur étude précédente et y ont ajouté des tâches de mesure de la mémoire auditivo-phonologique à court-terme (répétition de listes de trigrammes, manipulation de phonèmes) et une tâche de détection de cibles. Dans cette dernière, une cible est présentée au sujet qui doit déterminer son emplacement d'apparition (gauche/droite). Cette cible pouvait être visuelle (un point apparaissant à gauche ou à droite d'une croix de fixation placée sur l'écran en face du sujet), auditive (une tonalité émise dans le haut parleur situé à gauche ou à droite de l'écran) ou audio-visuelle (une combinaison des deux conditions précédentes du même côté du sujet). Selon les auteurs, le passage d'une condition à une autre doit rendre compte de la capacité des sujets à **déplacer leur attention entre différentes modalités sensorielles**.

L'amélioration de la vitesse de lecture et de l'attention visuelle localisée constatée par (Franceschini et al., 2013) ont été reproduits. L'entraînement à base de mini-jeux d'action n'a pas amélioré les performances des sujets pour les tâches d'attention visuelle distribuée, sa difficulté étant supérieure à celle de la tâche d'attention localisée.

Les sujets entraînés aux jeux d'action ont significativement amélioré leurs performances aux tâches de mémoire auditivo-phonologique alors qu'aucune amélioration n'a été constatée pour le groupe contrôle. Ce résultat pose aussi question, étant donnée la nature essentiellement visuelle des stimuli contenus dans les mini-jeux d'action. Une hypothèse est que la pratique des jeux vidéo d'action a amélioré les capacités attentionnelles totales du sujet, ce qui leur a permis ensuite de renforcer par conséquent la représentation orthographique associée aux syllabes de leur langue lorsqu'ils y sont exposés. Une étude suggère d'ailleurs que les ressources attentionnelles se partageraient entre les voies de traitement visuelles et auditives (Fougnie, Cockhren, & Marois, 2018). Cette hypothèse reste à confirmer ultérieurement.

Enfin, concernant la tâche de détection de cibles en deux modalités sensorielles, les enfants du groupe action n'ont pas amélioré leurs performances mais les auteurs ont constaté que le coût de passage de la condition visuelle à la condition auditive dans cette tâche avait été diminué par l'entraînement aux jeux d'action. Les auteurs postulent que l'entraînement aux jeux d'action n'a pas nécessairement amélioré la quantité de ressources attentionnelles mobilisables, mais leur vitesse d'allocation à des portions de la scène visuelle. Selon nous, cette interprétation est difficile à concilier avec les multiples résultats expérimentaux mon-

trant une absence de différence entre joueurs et non-joueurs en terme de vitesse d’orientation de l’attention ( $d\mu/dt$  inchangé). En revanche, le déplacement de ressources attentionnelles de la modalité visuelle à la modalité auditive peut correspondre à une amélioration de  $dA/dt$ , dont on a discuté précédemment (voir Section 4.2.2).

### 4.3.2 L’empan visuo-attentionnel est impliqué en lecture et potentiellement entraîné par les jeux vidéo d’action

Les études citées à la section précédentes soulèvent plusieurs questions. Si ce sont bien les processus attentionnels ciblés par les jeux d’action qui sont responsables de l’amélioration des performances en lecture, à quel niveau du processus de lecture agissent-ils ?

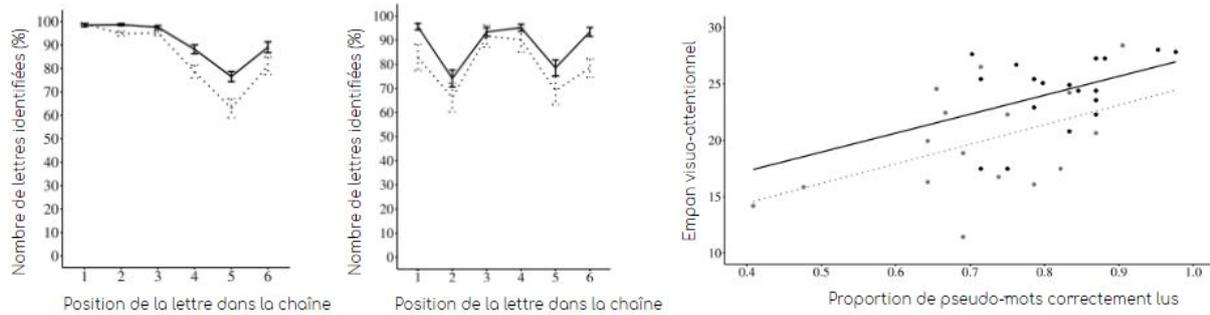
Selon l’équipe de Franceschini, la pratique des jeux d’action améliore à la fois la **mémoire de travail, l’attention visuo-spatiale et la capacité à déplacer son attention de la modalité visuelle à la modalité auditive**. Toutes ces améliorations conduisent selon eux à une hausse des performances en lecture. Nous avons déjà discuté du déplacement attentionnel transmodal  $dA/dt$ , et nous allons discuter ici de l’impact du jeu d’action sur la mémoire à court terme.

Plusieurs études ont montré que les joueurs de jeux d’action présentent effectivement de meilleures performances en mémoire visuelle à court terme (Boot et al., 2008 ; Colzato et al., 2013 ; Sungur & Boduroglu, 2012). Cependant, celles-ci ne seraient vraisemblablement dues ni à un moindre déclin de l’information en mémoire, ni à une augmentation de la capacité de mémoire à court terme, mais à une plus grande « sensibilité » aux informations perceptives (Appelbaum, Cain, Darling, & Mitroff, 2013 ; Wilms et al., 2013). Or, selon nous, cette sensibilité pourrait être le reflet de meilleures capacités attentionnelles. Une étude supplémentaire sur la mémoire verbale des joueurs semble aller dans ce sens : lorsque l’on demande à des joueurs et non-joueurs de jeux vidéo d’action d’écouter un texte de 30 s, puis d’en restituer à l’oral le maximum de détails, les performances des deux groupes sont équivalentes (Cain, Landau, & Shimamura, 2012).

Notre hypothèse est que la pratique des jeux d’action améliore la quantité globale de ressources attentionnelles et/ou la capacité de les répartir, soit dans l’espace visuel, soit dans les différentes couches de traitement. En ne considérant que les traitements visuels (c’est-à-dire, « à  $dA/dt$  fixe »), il reste la capacité attentionnelle  $Qa$  et la flexibilité sur l’étendue  $\sigma$  de la distribution attentionnelle à considérer. Le sujet traitant des unités lexicales et sous-lexicales plus grandes, cela pourrait, à lui seul, expliquer de meilleures performances en lecture. Ce dernier point est partagé par d’autres équipes, même si elles ne se prononcent pas sur les mécanismes à l’œuvre. Par exemple, en citant Bavelier, Green, et Seidenberg (2013, p. 282) :

Franceschini et al.’s action-game trained subjects showed decreases in naming latencies, as would occur if they transitioned to using larger multi-letter units. This might result, as suggested, from the attentional effects of action video games on orthographic processing.

La pratique des jeux vidéo d’action augmente vraisemblablement la quantité  $Qa$  de ressources attentionnelles disponible et/ou améliore le contrôle de leur répartition dans l’espace  $\sigma$  (voir Section 4.2. Or, nous avons vu à la section 3.2.2 que ces deux paramètres sont justement ceux qui expliquent la mesure de l’empan visuo-attentionnel, et que ce dernier est étroitement lié au processus de lecture. Il reste à savoir s’il existe un lien entre empan visuo-attentionnel et pratique des jeux vidéo d’action.



**FIGURE 4.8** – *Proportion de réussite pour chaque position de la chaîne de lettres en tâche de report global (à gauche) et en tâche de report partiel (au centre). A droite, corrélation entre empan visuo-attentionnel et la proportion de pseudo-mots correctement lus en 60 ms. A gauche et au centre : en abscisse, la position des lettres dans la chaîne, en ordonnée le taux d'identification correcte. A droite, en abscisses, la proportion de pseudo-mots correctement lus et en ordonnée la performance moyenne sur les tâches de report partiel et global. Les courbes en pointillés correspondent aux non-joueurs, et les courbes pleines aux joueurs de jeux d'action. Adaptés de (Antzaka et al., 2017).*

Dans l'étude de Franceschini et al. (2013), les tâches d'attention « soutenue » proposées ont des points communs avec les tâches de report utilisées pour mesurer l'empan visuo-attentionnel, et l'entraînement à base de jeu vidéo d'action proposé aux participants dyslexiques semble avoir amélioré leurs performances. Par ailleurs, l'empan visuo-attentionnel corrèle au niveau de performance sur des tâches où la stratégie de répartition attentionnelle est différente du processus de lecture. Une expérience a étudié la capacité des sujets, dyslexiques ou non, à réaliser une tâche de recherche spatiale visuelle ou auditive selon la condition (Lallier et al., 2013). Il s'avère que les enfants dyslexiques, qui ont un empan visuo-attentionnel réduit, sont moins bons que le groupe contrôle en recherche visuelle, mais pas en recherche auditive. De plus, les performances en tâche de report prédisent les performances en recherche visuelle. Enfin, l'empan visuo-attentionnel n'est pas une capacité uniquement liée au traitement visuel des items verbaux, comme les lettres, les chaînes de lettres et les mots (Lobier, Zoubrinetzky, & Valdois, 2012) et n'est pas contraint à la seule dimension horizontale (Lobier et al., 2013). L'empan visuo-attentionnel n'est donc pas spécifique à la lecture et pourrait être mobilisé dans le cadre des jeux vidéo d'action.

Afin d'évaluer un effet potentiel des jeux vidéo d'action sur l'empan visuo-attentionnel, notre équipe de recherche a comparé les capacités d'empan visuo-attentionnel de joueurs et de non-joueurs de jeux vidéo d'action (Antzaka et al., 2017). Les participants ont passé des tâches de report partiel et global de séquences de consonnes, et une épreuve de lecture de pseudo-mots. Étant donné que les participants étaient tous des lecteurs experts, cette dernière a été passée dans des conditions volontairement difficiles, avec des temps de présentation de 60 ms avant masquage. Cette brève durée de présentation empêche toute saccade oculaire et force le participant à un traitement parallèle, il doit donc distribuer son attention sur la totalité de la chaîne pour pouvoir l'analyser au mieux dans le temps imparti.

Les joueurs de jeux vidéo d'action ont eu des performances supérieures à celles des non-joueurs en tâche de report partiel et global (voir Figure 4.8). Notons que pour les performances sur les tâches de report partiel, les joueurs ont un taux d'identification supérieur sur toutes les positions qui composent la chaîne de consonnes. Cette supériorité des joueurs de jeux vidéo d'action sur ces deux tâches a pour conséquence que ces derniers ont un empan

visuo-attentionnel supérieur à celui des non-joueurs.

Les joueurs ont aussi eu de meilleures performances en lecture, ce qui révèle une amélioration de la vitesse de lecture. Alors que les non-joueurs sont capables de lire correctement 68.44% des pseudo-mots lorsqu'ils sont présentés en seulement 60 ms, ce taux est de 79.34% chez les joueurs de jeu vidéo d'action. Les résultats montrent également que tout participants confondus, les performances aux tâches de report et à la tâche de lecture sont corrélées. L'empan visuo-attentionnel pourrait donc être un des liens entre pratique des jeux vidéo d'action et performances en lecture. Les joueurs de jeu vidéo d'action semblent capables de traiter de plus larges unités sous-lexicales du fait de leurs plus grandes ressources attentionnelles ou de la plus grande étendue  $\sigma$  de leur champ de focalisation attentionnelle. Cette expérience ne permet pas de mettre en évidence une éventuelle amélioration de la vitesse d'orientation de l'attention car les temps de présentation très faibles des séquences de consonnes dans les tâches de report (200 ms) et de lecture (60 ms) ne permettent pas de réengagement de l'attention.

Si les résultats précédents ne confirment pas avec certitude l'existence d'un lien causal entre pratique des jeux vidéo d'action et amélioration des mécanismes attentionnels impliqués en lecture, ils suggèrent que ceux-ci pourraient bien être mobilisés par la pratique des jeux vidéo d'action. Ce point semble confirmé par la définition même des jeux vidéo d'action (Bediou et al., 2017). La haute vitesse des événements du jeu favorise la mise en place de stratégies d'analyse parallèle de la scène visuelle, impliquant donc un  $\sigma$  ou un  $Qa$  élevé. Le passage de l'analyse globale de la scène à une analyse locale d'une zone en particulier nécessite de sélectionner cette dernière avec justesse parmi un ensemble de candidats traités simultanément (Joseph, Chun, & Nakayama, 1997), et nécessite donc d'avoir un grand  $\sigma$  (et un  $d\sigma/dt$ , même si cela n'a pas été montré expérimentalement). Enfin, l'imprévisibilité des événements du jeu limite le recours à des procédures apprises et stockées en mémoire à long terme et nécessite donc une bonne analyse des éléments en présence pour élaborer une stratégie efficace : là encore une supervision de la scène avec un grand  $\sigma$  ou un  $Qa$  élevé doit être réalisée par le joueur.

L'ensemble de ces résultats laisse penser que  $\sigma$  et/ou  $Qa$  ont été augmentés par la pratique des jeux vidéo d'action. L'implication de ces grandeurs en lecture nous amène à faire l'hypothèse que la pratique d'un jeu vidéo d'action augmenterait soit la quantité totale  $Qa$  d'attention, soit la capacité à en manipuler efficacement l'étendue spatiale  $\sigma$ , ce qui résulterait à la fois en une augmentation de l'empan visuo-attentionnel et des performances en lecture.

Une étude semble cependant apporter des éléments contradictoires à cette hypothèse (Łuniewska et al., 2018). Les auteurs ont entraîné des enfants dyslexiques âgés de 9 à 13 ans aux mêmes mini-jeux d'action et contrôles que dans l'étude de Franceschini et al. (2013). Ils ont rajouté un troisième groupe qui a suivi un protocole d'entraînement de la phonologie. Quel que soit le groupe considéré, les auteurs n'ont trouvé aucune amélioration ni des performances attentionnelles, ni des performances phonologiques et concluent donc que ni l'un ni l'autre ne semblent efficaces pour améliorer les compétences en lecture des enfants dyslexiques. Deux limitations viennent nuancer leur interprétation.

- L'hétérogénéité des dyslexies n'est pas prise en compte par les auteurs, or seul un entraînement ciblé du déficit sous-jacent à la dyslexie peut compenser les effets négatifs de ce trouble développemental (Zoubrinetzky, 2015). Leur population est peut-être composée de dyslexiques au profil cognitif variable, mélangeant des « dyslexiques phonologiques purs », des « dyslexiques VA purs », et des dyslexiques mixtes, ce qui peut bruiser leur données.

- La tâche utilisée par les auteurs pour mobiliser l'attention visuelle est très différente des tâches de report. Celle-ci est extraite d'une batterie de test polonais se déroulant sur feuille : le contrôle des temps de présentation des stimuli est absent, et ne permet pas de forcer un traitement parallèle des séquences d'items.

Ces différents points suggèrent d'une part, que l'empan visuo-attentionnel a pu être amélioré mais n'a pas été mesuré, et d'autre part que l'éventuelle amélioration des capacités attentionnelles n'a pas pu se manifester sur les performances en lecture car elle ne compense pas les effets délétères d'un déficit phonologique sous-jacent s'il est présent et non identifié. Nous maintenons donc notre hypothèse de travail sur le lien entre pratique du jeu vidéo d'action, empan visuo-attentionnel et performance en lecture.

#### RÉSUMÉ DU CHAPITRE 4

Les jeux vidéo d'action entraînent-ils bel et bien les dimensions de l'attention visuelle impliquées en lecture ? Voici les réponses qu'apporte ce chapitre :

- Les jeux vidéo d'action sont définis par quatre propriétés : haute vitesse, alternance entre une analyse locale/globale de la scène visuelle, imprévisibilité spatiale et temporelle, et forte charge perceptive, cognitive et motrice.
- Les jeux vidéo d'action ont un impact positif sur un grand nombre de fonctions cognitives et notamment sur l'attention visuelle.
- Les jeux vidéo d'action semblent augmenter la quantité de ressources attentionnelles disponibles  $Qa$  et/ou améliorer le contrôle de leur répartition dans l'espace  $\sigma$ .
- Deux études montrent que la pratique des jeux vidéo d'action améliore l'attention visuelle et les performances en lecture d'enfant dyslexiques. Ces résultats sont compatibles avec l'hypothèse d'une augmentation de  $\sigma$  et/ou  $Qa$ .
- Les joueurs de jeux vidéo d'action ont un plus grand empan visuo-attentionnel et de meilleures performances en lecture.
- Ces observations nous amènent à formuler une hypothèse : la pratique des jeux vidéo d'action augmenterait soit la quantité totale d'attention  $Qa$ , soit la capacité à en moduler l'étendue spatiale  $\sigma$ , soit les deux, ce qui augmenterait conjointement l'empan visuo-attentionnel et les performances en lecture.

Les jeux vidéo d'action semblent pertinents pour améliorer les performances en lecture parce qu'ils ciblent les paramètres qui contribuent aux performances en tâche de report et en lecture.

Deuxième partie

Conception du logiciel Evasion



# Chapitre 5

## Evasion, présentation d'un jeu vidéo d'action éducatif

Dans la première partie de cette thèse, nous avons établi le lien théorique entre attention visuelle et apprentissage lecture. Plus particulièrement, nous avons proposé un modèle minimal de l'attention visuelle, et avons remarqué que les dimensions impliquées dans le processus de lecture étaient la quantité totale de ressources attentionnelles disponibles  $Qa$  et leur dispersion dans l'espace  $\sigma$ . Nous avons ensuite vu que le jeu vidéo d'action était justement un entraînement pertinent de ces dimensions, dont l'aspect ludique le rend particulièrement adapté à une utilisation en classe grâce à son aspect ludique.

Notre jeu empruntera les tâches utilisées en remédiation de l'empan visuo-attentionnel et les enrichira avec les mécanismes des jeux vidéo d'action. Ce jeu, que nous avons nommé Evasion, a trois objectifs : augmenter l'empan des élèves, renforcer leur expertise perceptive pour les lettres et séquences de lettres et améliorer l'encodage et la reconnaissance visuelle des unités orthographiques du français.

Evasion a été développé par la société Xiwen Studio<sup>1</sup> sur la base de nos spécifications. Nous avons donc fourni un cahier des charges qui définit le support et les types de tâches à utiliser ainsi que les stimuli et la manière dont ils seront intégrés au sein du gameplay. Nous avons enfin précisé la manière dont notre jeu utilise Parseval, l'algorithme d'adaptation de la difficulté en fonction de la performance des élèves.

Les différentes étapes de conception du logiciel constituent le plan du Chapitre 5. Concernant Parseval, son fonctionnement fera l'objet du Chapitre 6.

### 5.1 Support utilisé

Notre jeu prend la forme d'une application mobile développée sur tablette tactile. Les modèles utilisés sont des iPad Air 2. L'usage d'une tablette tactile et la proximité des mains des joueurs qu'elle induit avec la scène visuelle a une influence sur l'analyse de cette dernière.

De manière générale, les performances des sujets en tâche de détection sont meilleures lorsqu'ils répondent en appuyant directement sur le stimulus que par l'entremise d'un clavier (Adam et al., 2008). Ces résultats se retrouvent aussi pour des tâches de résolution de calcul (Segal, 2011) ou de reconnaissance de lettres (Adam, Bovend'Eerdt, van Dooren, Fischer, & Pratt, 2012). Il s'avère que positionner ses mains près d'un stimulus modifie l'allocation des ressources attentionnelles dans la portion du champ visuel où il se trouve. Ainsi en détection

---

1. <http://www.xiwenstudio.com/>

de cible indiquée, les participants sont meilleurs quand le stimulus à traiter est proche des mains (Reed, Grubb, & Steele, 2006).

Curieusement, dans cette configuration, les participants ont aussi un clignement attentionnel plus long et un temps d'inhibition de retour oculaire plus court ; leurs temps de réponse sont plus longs en tâche de recherche visuelle (Abrams, Davoli, Du, Knapp, & Paull, 2008). Une explication de ces résultats serait que la proximité de la main améliore l'engagement de l'attention, mais nuit à son désengagement (Thomas & Sunny, 2017 ; Tseng, Bridgeman, & Juan, 2012). Cette interprétation semble confirmée par la réduction des interférences que peuvent causer des événements concurrents apparaissant ailleurs dans le champ visuel (Davoli, Brockmole, & Goujon, 2012). Cette modification attentionnelle est plus importante lorsque les sujets utilisent leur main dominante que leur main non-dominante (Le Bigot & Grosjean, 2012 ; Lloyd, Azañón, & Poliakoff, 2010 ; Tseng et al., 2012).

De nombreux résultats confirment qu'utiliser la tablette tactile comme support d'entraînement n'est pas anodin. Il faut d'ailleurs remarquer que l'ensemble des études du domaine citées précédemment utilisent une interface manette ou clavier-souris. Lors de la conception de notre jeu, nous ne savions pas dans quelle mesure l'utilisation de la tablette tactile et la proximité des mains des participants auraient un impact sur l'entraînement proposé.

## 5.2 Choix des tâches

### 5.2.1 Justification de nos choix

Pour définir le *gameplay* de notre jeu, c'est-à-dire l'enchaînement des tâches que l'élève doit réaliser pour le réussir, nous nous sommes en partie inspirés des tâches qui ont déjà fait leurs preuves en matière d'amélioration de l'EVA. Nous avons repris celles précédemment utilisées dans les protocoles de remédiation d'enfants dyslexiques pour améliorer leur empan visuo-attentionnel (Lobier, 2008 ; Valdois, Peyrin, et al., 2014). Pour rappel, celles-ci étaient des tâches d'identification, de catégorisation, de comparaison de séquences et de recherche visuelle (voir Chapitre 2). Nous les avons toutes intégrées à notre jeu, hormis les tâches de catégorisation.

En effet, les processus VA impliqués dans les tâches de catégorisation sont similaires à ceux en jeu dans les tâches d'identification (Lobier, Peyrin, Pichat, Le Bas, & Valdois, 2014) mais ils induisent une analyse visuelle moins approfondie du stimulus. Les sujets mettent plus de temps à réaliser les tâches d'identification que de catégorisation (Grill-Spector & Kanwisher, 2005), ce qui indique que le traitement réalisé lors de l'identification est plus fin. Certaines théories font d'ailleurs de la catégorisation une étape préliminaire à l'identification, comme la Theory of Visual Attention de Bundesen et al. (2005).

Nous avons préféré les tâches d'identification à celles de catégorisation pour forcer un traitement plus fin des stimuli et ainsi augmenter la charge perceptive induite par le jeu vidéo d'action. Après avoir défini nos tâches, nous avons dû choisir la manière dont les intégrer dans le jeu.

La principale menace qui pèse sur le concepteur de logiciels d'entraînement est celle de la spécificité de l'apprentissage. On parle de spécificité d'apprentissage lorsque le participant réussit de mieux en mieux les entraînements proposés, signe qu'il a appris, mais que cette amélioration ne se retrouve pas dans des tests censés mobiliser les mêmes compétences. A l'inverse, quand l'apprentissage se généralise à d'autres contextes, on dit qu'il y a eu transfert d'apprentissage. Ce phénomène est très bien documenté pour les apprentissages perceptifs et moteurs (Fahle, 2005 ; Fiorentini & Berardi, 1980 ; Wulf & Shea, 2002) où les améliorations

dues à l'apprentissage restent spécifiques au type de stimuli utilisé ou à la portion du champ visuel entraînée. Pour les entraînements des fonctions de plus haut niveau, la plupart des jeux « d'entraînements cérébraux » sont tombés dans cet écueil et ne font pas progresser les joueurs aux tests standards des grandes fonctions cognitives (Owen et al., 2010). De même, certains entraînements qui ciblent spécifiquement la mémoire, le raisonnement ou la recherche visuelle peuvent améliorer le score des participants à des tests standardisés sans pour autant avoir d'impact sur les tâches de la vie quotidienne qui mobilisent pourtant les fonctions cognitives entraînées (Ball et al., 2002).

Les entraînements précédemment cités ont en commun de cibler une fonction unique et bien délimitée et de proposer des design expérimentaux très épurés inspirés des tests de référence. À l'inverse, les entraînements utilisant des tâches plus complexes semblent induire une meilleure généralisation des apprentissages. C'est le cas des jeux vidéo d'action, qui en plus d'améliorer les performances des joueurs sur des tâches spécifiques (voir Chapitre 4), améliorent la réalisation de tâches complexes non ciblées par le jeu, comme le pilotage d'avion (Gopher, Well, & Bareket, 1994) ou la chirurgie (Rosser et al., 2007). La pratique du sport (Colcombe & Kramer, 2003) et de la musique (Rauscher et al., 1997 ; Schellenberg, 2004) semble également améliorer les performances cognitives en général. Green et Bavelier (2008) en proposent une explication : ces entraînements généraux mobilisent un grand nombre de fonctions cognitives simultanément et ainsi favorisent un « apprentissage alterné ».

L'apprentissage alterné consiste à utiliser différentes tâches au sein d'un même entraînement. Comparé à un apprentissage par bloc, l'apprentissage alterné induit un temps d'apprentissage plus long mais une meilleure rétention, et un meilleur transfert d'apprentissage. C'est vrai dans le domaine moteur (Schmidt & Bjork, 1992 ; Wulf & Shea, 2002) mais aussi pour les apprentissages de plus haut niveau cognitif (Kang & Pashler, 2012 ; Mayfield & Chase, 2002 ; Rohrer & Taylor, 2007). Introduire de la variété au niveau des stimuli semble aussi favoriser le transfert d'apprentissage. Dans le domaine du langage, entraîner les participants à reconnaître des dialectes qu'ils ne connaissent pas en leur faisant écouter plusieurs locuteurs pour chaque dialecte améliore le transfert d'apprentissage lorsqu'ils doivent écouter de nouveaux locuteurs (Clopper & Pisoni, 2004). En reconnaissance de lettres, exemple qui nous concerne directement, certaines études ont entraîné les participants à reconnaître des lettres tracées sur leur peau par un dispositif dédié. Ceux qui avaient été entraînés avec un grand nombre de lettres ont été meilleurs pour associer des stimuli « tactiles » nouveaux avec leur représentation visuelle, par rapport à ceux qui avaient été entraînés avec un échantillon de lettres plus restreints (Arnold & Auvray, 2018).

Un modèle bayésien hiérarchisé permet de rendre compte de l'effet de l'apprentissage alterné sur la généralisation (Kemp, Goodman, & Tenenbaum, 2010). Ce modèle suppose que les différentes tâches peuvent être organisées de manière hiérarchique en fonction des propriétés qu'elles partagent. À chaque « nœud » hiérarchique correspond un niveau d'induction, les niveaux les plus haut correspondant aux apprentissages bien généralisés, les niveaux les plus bas à des apprentissages « tâches dépendant ». En proposant des tâches variées, le sujet apprend pas seulement les processus liés à une tâche en particulier, mais aussi à traiter les composantes qu'elles partagent les unes avec les autres. Son apprentissage a donc lieu à des niveaux d'induction plus haut dans la hiérarchie des tâches et se généralise mieux. Ce modèle a été développé pour rendre compte de l'apprentissage des liens causaux, mais peut rendre compte d'autres théories plus générales (Harlow, 1949) et notamment l'apprentissage perceptif (Arnold & Auvray, 2018).

## 5.2.2 Présentation des mini-jeux

Pour favoriser la généralisation des bénéfices que retirent les élèves en jouant à Evasion, nous avons donc veillé à proposer des entraînements suffisamment variés. C'est pour cela que nous avons conçu l'entraînement sous la forme de 4 mini-jeux qui mêlent chacun les 3 tâches dont les bienfaits sur l'empan visuo-attentionnel sont reconnus. Nous avons intégré à ces jeux les 4 propriétés des jeux vidéo d'action afin de renforcer l'impact de ces tâches sur l'entraînement de l'empan visuo-attentionnel. Nos quatre jeux se nomment l'Attrape-Lettre, la Forêt en T, la Tour des lettres et l'Omelette. Pour chacun d'entre eux, nous présenterons le principe général, le fonctionnement et la manière dont ils respectent les 4 critères des jeux d'action.

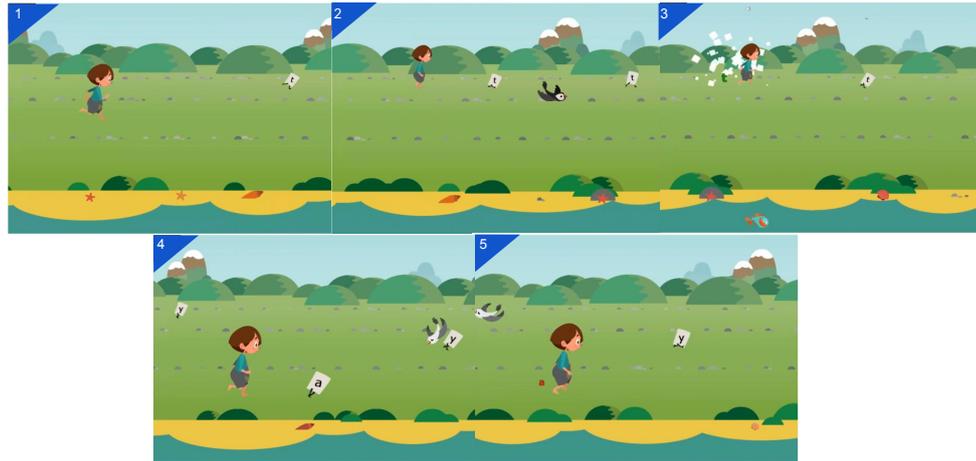
### 5.2.2.1 L'Attrape-Lettre

**Principe général (voir Figure 5.1)** En début de session, le jeu affiche une lettre ou une séquence de lettres. Celle-ci sera le stimulus-cible, c'est-à-dire un élément d'intérêt que l'élève devra retrouver dans la scène visuelle. Le stimulus-cible disparaît et fait place à la scène de jeu. Elle est composée de trois couloirs horizontaux qui occupent les deux tiers de l'écran. Un personnage est placé sur la partie gauche de l'écran, à 4 cm du bord de l'Ipad. Ce personnage se met à courir, mais sa position horizontale reste constante : c'est le reste du décor derrière lui qui défile pour donner une impression de déplacement. L'élève ne peut pas contrôler le mouvement du personnage de gauche à droite, mais peut le déplacer de haut en bas dans les différents couloirs en faisant glisser son doigt dans le sens voulu. Différentes pages contenant des lettres ou séquences de lettres apparaissent dans les couloirs par le bord droit de l'écran et se dirigent vers l'élève. Parmi elles se trouveront des pages qui contiennent des stimuli-cibles et d'autres qui contiennent les stimuli-distracteurs. L'élève doit attraper les stimuli-cibles en positionnant son personnage dans le couloir correspondant, et éviter les stimuli-distracteurs en plaçant le personnage dans un couloir différent de celui du distracteur. Périodiquement, le jeu affiche une nouvelle séquence de lettres qui change le stimulus-cible à attraper. De nouveaux distracteurs seront générés en fonction de la cible choisie.

**Condition de réussite** La réussite de l'élève est calculée pour chaque page. Il réussit s'il attrape un stimulus-cible ou s'il évite un stimulus-distracteur. Il échoue s'il attrape un stimulus-distracteur ou s'il évite un stimulus-cible.

**Feedback** Lorsque l'élève attrape un stimulus-cible, la page laisse place à une gerbe de lettres vertes et déclenche un bruit doux de carillon. Lorsque l'élève attrape un stimulus-distracteur, la page laisse place à une gerbe de lettres rouges et déclenche un bruit de ressort. Lorsque l'élève évite un stimulus-cible, la page disparaît et le stimulus qu'elle contient apparaît écrit en bleu. Il ne se passe rien lorsque l'élève évite un stimulus-distracteur.

**Imprévisibilité spatiale et temporelle** Les nouvelles pages apparaissent toujours à droite de l'écran, mais une incertitude demeure quant au couloir qu'elles empruntent. De plus, l'élève ne sait pas a priori si la nouvelle page contient un stimulus-cible ou un stimulus-distracteur : il devra l'analyser finement pour trancher et planifier le déplacement adéquat. Enfin, si l'élève peut anticiper l'apparition des pages sur la droite, il ne peut pas savoir a priori quand elles apparaîtront. L'imprévisibilité spatiale est donc maintenue, l'imprévisibilité temporelle est garantie.



**FIGURE 5.1** – Images tirées de l'Attrape-Lettre. En 1, le personnage est initialement placé sur le couloir central des pages apparaissent au bord droit de l'écran et se dirigent vers lui. En 2 et 4, le personnage peut se déplacer de haut en bas de manière à attraper les pages qui correspondent à la séquence de référence. En 3, si la page attrapée contient le stimulus-cible (ici le t), un feedback positif se déclenche. En 5, si la page attrapée contient un stimulus-distracteur, un feedback négatif se déclenche.

**Vitesse et succession rapide des éléments** La vitesse de défilement de l'écran et leur nombre sont des paramètres de difficulté manipulés par Parseval. Ils seront donc raisonnablement élevés et contrôlés en fonction des performances du joueur.

**Alternance entre analyse globale et locale de la scène visuelle** Le sujet devra analyser la globalité de la scène visuelle pour choisir les zones à traiter en priorité et planifier son mouvement en fonction, mais aussi superviser le bord droit de l'écran pour actualiser sa représentation de la scène. L'élève contrôlera aussi périodiquement la portion gauche de l'écran pour vérifier que les événements qu'il a prédits correspondent bien à la réalité.

**Charges perceptive, cognitive et motrice** L'Attrape-Lettre contient des éléments mobiles très colorés (des oiseaux ou des poissons) qui traversent l'écran près des pages pour attirer l'attention du joueur. L'élève doit alors faire un effort pour maintenir ses ressources attentionnelles sur les pages et non sur ces éléments colorés, au risque de commettre des erreurs dues à un mauvais traitement visuel de la scène. De plus, le nombre d'éléments présents au sein d'une vague est un paramètre de difficulté ajusté par Parseval de manière à augmenter la charge perceptive et augmenter légèrement la charge motrice. Tout au long du jeu, l'élève doit garder en mémoire le stimulus-cible qui lui a été présenté. Bien que le feedback vienne périodiquement donner une information à l'élève sur ce qu'il doit mémoriser, ce maintien en mémoire ajoute une charge cognitive.

### 5.2.2.2 Forêt en T

**Principe général (voir Figure 5.2)** En début de session, le jeu affiche une séquence de lettres à l'élève : le stimulus-cible. Le stimulus disparaît et laisse place à une forêt. Celle-ci est habitée par plusieurs fantômes portant, chacun sur leur ventre, une ou plusieurs lettres.



**FIGURE 5.2** – Images tirées de la Forêt en T. En 1, la forêt apparaît, avec plusieurs fantômes en mouvement. En 2, deux fantômes se tiennent la main, et forment le stimulus-cible. En 3, si l’élève appuie sur le couple, un feedback positif se déclenche. En 4, un couple de fantômes se tient la main et forme une séquence qui ne correspond pas au stimulus-cible. En 5, si l’élève appuie sur ce couple, un feedback négatif se déclenche.

Ces fantômes se déplacent de gauche à droite mais sont à une position fixe verticalement. Ils occupent plusieurs plans en « profondeur » de la scène visuelle. Périodiquement, un couple de fantômes passe au premier plan et se tient la main. Les lettres qu’ils contiennent chacun forment alors une syllabe, soit le stimulus-cible, soit un stimulus-distracteur. Si cette syllabe correspond au stimulus-cible, l’élève doit appuyer dessus. Sinon, il doit ignorer le couple de fantômes. Certains fantômes disparaissent au bout d’une durée variable et de nouveaux fantômes arrivent au fur et à mesure. Périodiquement, le jeu affiche une nouvelle séquence de lettres qui changera le stimulus-cible à détecter à partir duquel seront générés de nouveaux distracteurs.

**Condition de réussite** La réussite de l’élève est calculée pour chaque couple de fantômes qui se tient la main. L’enfant réussit s’il appuie sur un couple qui forme le stimulus-cible et s’il ignore ceux qui forment un stimulus-distracteur. Il échoue s’il appuie sur un couple qui forme un stimulus-distracteur ou s’il ignore un couple qui forme un stimulus-cible.

**Feedback** La nature et les conditions de déclenchement des feedbacks sont les mêmes que pour l’Attrape-Lettre.

**Imprévisibilité spatiale et temporelle** Les fantômes se déplacent en suivant une trajectoire aléatoire. La durée à laquelle apparaît un nouveau fantôme varie. L’élève ne peut pas prédire où et quand un couple va se former et doit continuer à superviser les membres d’un potentiel futur couple.

**Vitesse et succession rapide des éléments** Les fantômes sont en mouvement permanent mais étant donné leur nombre, nous leur avons donné une vitesse modérée pour ne pas excéder les capacités en suivi de cibles multiples d’un élève de CP.



**FIGURE 5.3** – Images tirées de la *Tour des Lettres*. En 1, l'étage apparaît, avec plusieurs portes surmontées par une inscription. En 2, si l'élève appuie sur une porte qui correspond au stimulus-cible, un feedback positif se déclenche. En 3, si l'élève appuie sur une porte qui ne correspond pas au stimulus-cible, un feedback négatif se déclenche.

**Alternance entre analyse globale et locale de la scène visuelle** L'espace occupé par les fantômes recouvre les deux tiers de la scène visuelle. L'élève doit maintenir une vigilance globale sur l'ensemble de cette portion de l'écran pour à la fois surveiller les éventuels futurs couples et analyser les nouveaux fantômes qui apparaissent au fur et à mesure.

**Charges perceptive, cognitive et motrice** Le nombre de fantômes qui apparaissent simultanément est un paramètre manipulé par Parseval. La charge perceptive induite par leur nombre est proportionnelle aux performances des joueurs. Ces fantômes étant en mouvement constant, l'élève doit surveiller leurs déplacements et anticiper la formation de couples cibles, ce qui induit une charge supplémentaire. Par ailleurs, comme pour l'Attrape-Lettre, des éléments mobiles, en l'occurrence des chouettes et des hérissons, traversent l'écran pour attirer l'attention de l'élève.

### 5.2.2.3 La tour des lettres

**Principe général (voir Figure 5.3)** En début de session, le jeu affiche une séquence de lettres à l'élève : le stimulus-cible. Le stimulus disparaît et laisse place à une tour dont 3 étages sont visibles simultanément avec, à chaque étage, plusieurs portes fermées. Au dessus de chaque porte se trouve une inscription : une seule d'entre elles porte le stimulus-cible, les autres correspondent à un stimulus-distracteur. L'élève dispose de 5 secondes pour appuyer sur la porte en haut de laquelle est inscrit le stimulus-cible. La porte ainsi sélectionnée s'ouvre, révélant à l'élève s'il a réussi ou non et la scène visuelle se déplace vers un étage supérieur de la tour, où se trouvent de nouvelles portes. S'il n'a pas appuyé pendant le temps imparti, aucune porte ne s'ouvre avant le changement d'étage. Au bout de 3 à 6 changements étages, le stimulus-cible change, ainsi que les distracteurs associés.

**Condition de réussite** L'élève réussit quand il a appuyé sur la porte qui est surmontée du stimulus-cible. L'élève échoue s'il a appuyé sur une mauvaise porte ou s'il n'a pas répondu au bout du temps imparti.

**Feedback** Lorsque l'enfant réussit, la porte s'ouvre, déclenche un bruit de carillon et laisse apparaître le personnage principal du jeu. Lorsque l'enfant appuie sur une mauvaise porte, elle s'ouvre, déclenche un bruit de ressort et laisse apparaître un renard.

**Imprévisibilité spatiale et temporelle** La cadence de passage aux étages supérieurs est connue de l'élève car elle est fixe ou déclenchée par une action de l'élève. Contrairement aux autres mini-jeux, la Tour des lettres n'est pas temporellement imprévisible, et il n'y a toujours qu'une seule bonne cible à trouver par étage. En revanche, le nombre et l'emplacement des portes varie à chaque étage et l'élève ne sait donc pas a priori où se trouve la porte avec le stimulus-cible.

**Vitesse et succession rapide des éléments** Dans ce jeu, les modifications de la scène visuelle ne sont pas progressives : dès que l'on passe à un étage supérieur, la scène visuelle est intégralement modifiée. Ainsi, contrairement aux autres mini-jeux où des éléments uniques évoluaient rapidement, nous avons ici un très grand nombre d'éléments qui changent simultanément.

**Alternance entre analyse globale et locale de la scène visuelle** Les éléments d'intérêt sont répartis sur la quasi totalité de l'écran. L'élève doit répartir son attention sur la scène visuelle complète pour repérer les emplacements où se trouvent les inscriptions, puis les analyser ensuite plus finement.

**Charges perceptive, cognitive et motrice** Là encore, des éléments visuels en mouvement traversent le décor pour détourner l'attention de l'élève. Les inscriptions font intervenir des séquences qui vont de 2 à 4 lettres (voir Section 5.3), et le nombre de portes varie de 4 à 9. La contrainte de temps imposée rend la tâche difficile lorsque le nombre de portes à traiter est grand. Cette contrainte augmentant fortement la charge perceptive, nous avons choisi de ne pas rajouter de charge cognitive ou motrice.

#### 5.2.2.4 Omelette (voir Figure 5.4)

**Principe général** En début de session, le jeu affiche une séquence de lettres à l'élève : le stimulus-cible. Le stimulus disparaît et laisse place à un château au centre de l'écran, entouré de champs et de forêts. Plusieurs chemins relient le château aux bords de l'écran. La scène de jeu couvre l'un des quarts de ce décor. Des œufs apparaissent en bout de chemin et se dirigent vers le château. Ils portent chacun un drapeau qui contient soit le stimulus-cible, soit un stimulus-distracteur. Des obstacles apparaissent aléatoirement sur les chemins, entourés d'un contour rouge qui les met en évidence. Dès qu'un œuf rencontre un obstacle, il s'arrête de bouger et se met à sauter sur place. Au bout de 4 secondes, l'œuf disparaît. Pour empêcher la disparition de l'œuf, l'élève peut enlever l'obstacle en appuyant dessus. L'élève doit enlever les obstacles devant les œufs qui contiennent le stimulus-cible et laisser les obstacles devant les autres. Des gardes sont positionnés devant les portes du château. Ce sont aussi des obstacles mais ont un comportement particulier : ils sont présents dès le début du jeu, ils disparaissent à l'appui mais réapparaissent après l'entrée d'un œuf dans le château ou si l'élève appuie à nouveau. Ce comportement spécial permet de contrer les séquences de jeu où un œuf cible dont le chemin a été dégagé est suivi immédiatement d'un œuf distracteur qui ne doit pas entrer dans le château.



**FIGURE 5.4** – Images tirées de *L'Omelette*. En 1, un œuf est immobilisé par le garde. En 2, si l'élève appuie sur l'œuf qui contient le stimulus-cible, un feedback positif se déclenche. En 3, un œuf qui ne contient pas le stimulus-cible est immobilisé par le garde. En 4, si l'élève appuie dessus, un feedback négatif se déclenche. En 5, un œuf est immobilisé par un obstacle. En 6, si l'élève appuie dessus, l'obstacle disparaît et l'œuf peut progresser vers le château.

**Condition de réussite** L'élève réussit s'il fait entrer les œufs cibles et s'il empêche de faire rentrer les œufs distracteurs. L'élève échoue s'il a fait rentrer un œuf distracteur ou s'il a empêché de rentrer un œuf cible.

**Feedback** Lorsqu'un œuf cible entre dans le château, il disparaît, laisse place à une gerbe de lettres vertes et déclenche un bruit de carillon. Si un œuf distracteur entre dans le château, il disparaît, laisse place à une gerbe de lettres rouges et déclenche un bruit de ressort. Si un œuf cible n'a pas pu entrer dans le château, il disparaît et la séquence de lettres qu'il porte se colore en bleu.

**Imprévisibilité spatiale et temporelle** Les œufs apparaissent en bout de chemin; comme ces chemins sont statiques, les emplacement d'apparition sont connus. Cependant, l'élève ne sait ni sur quel chemin, ni quand un œuf va apparaître. Les obstacles sont générés aussi de manière aléatoire le long des chemins, à des instants variables. L'enfant ne sait donc pas en avance quels sont les œufs à surveiller en priorité. Ces deux types d'incertitudes garantissent l'imprévisibilité à la fois spatiale et temporelle des cibles.

**Vitesse et succession rapide des éléments** La vitesse du jeu est modérée, les œufs changeant d'emplacement chaque seconde, en « sautant » d'une position à une autre sur le chemin (les chemins sont découpés en « cases », invisibles pour l'élève).

**Alternance entre analyse globale et locale de la scène visuelle** L'enfant doit répartir son attention sur la totalité de l'écran pour détecter l'apparition d'obstacles devant les œufs tout en surveillant l'apparition de nouveaux œufs sur les bords de l'écran. De plus, le déplacement des œufs peut être de deux types : le mouvement par défaut, pour le déplacement le long des chemins, qui est saccadé, et un mouvement continu, lorsqu'un œuf saute sur

place face à un obstacle. Le premier, parce qu'il est saccadé, ne peut pas être suivi par le système visuel en périphérie ; en revanche, le second est facilement traité par le système visuel périphérique. Les déplacements des œufs étant trop nombreux pour être supervisés efficacement par une analyse sérielle, l'élève doit alors exercer une vigilance constante en périphérie de son champ visuel pour détecter les œufs qui sautent sur place et agir en conséquence.

**Charges perceptive, cognitive et motrice** La scène visuelle est très dense, avec des éléments du décor identiques aux obstacles qui peuvent apparaître sur le chemin. De plus, de nouveau, des oiseaux traversent la scène pour attirer l'attention de l'élève. Ces deux propriétés maintiennent une certaine charge perceptive sur le joueur. De plus, l'élève doit réaliser plusieurs tâches en parallèle : identifier les œufs à faire entrer, anticiper leur progression, débayer certains obstacles tout en surveillant l'apparition de nouveaux œufs ou obstacles. Ce mini jeu est celui qui impose la plus grande charge cognitive.

### 5.2.2.5 Scénario du jeu et design des personnages

Pour augmenter l'intérêt des enfants, nous avons ajouté un scénario à notre jeu, présenté par une cinématique d'introduction. L'aspect du personnage principal est peu genré pour susciter également l'intérêt des filles et des garçons. Les autres personnages de nos jeux sont des animaux, étant donné l'attrait spontané que les enfants semblent éprouver pour eux. A chaque jeu correspond un animal « totem » : un lapin pour l'Attrape-Lettre, un hibou pour la Forêt en T, un renard pour La tour des lettres, un coq pour l'Omelette. Lorsque l'élève a terminé un mini-jeu, c'est-à-dire au bout d'une durée d'environ 5 minutes, une animation mettant en scène l'animal totem vient le récompenser. L'animal le remercie depuis le haut d'une pile de pages dont la hauteur et le nombre de lettres qui en jaillissent dépendent du progrès de l'élève. En effet, nous avons préféré récompenser l'élève en fonction de son progrès plutôt qu'en fonction de ses performances réelles, pour éviter que les élèves les plus en difficulté ne se sentent en échec. Ainsi, nous avons 3 animations possibles selon que le progrès réalisé soit faible, moyen, ou fort.

## 5.3 Présentation de notre espace de difficulté

Pour améliorer son impact sur les performances des élèves, Evasion intègre Parseval, un algorithme d'adaptation de la difficulté. Nous détaillerons l'intérêt pédagogique de l'adaptation de la difficulté dans la section 6.1 et le fonctionnement de Parseval dans la section 6.2.

Parseval est un algorithme d'adaptation de la difficulté qui fonctionne dans Evasion de la manière suivante : à partir des observations recueillies sur les actions de l'enfant dans un mini-jeu, Parseval modifie les paramètres de difficulté de celui-ci pour que la probabilité que l'enfant le réussisse soit de 0,75.

Chaque mini jeu doit disposer de son propre espace de difficulté. Celui-ci est toujours constitué de 3 dimensions, chacune composée de 6 crans de difficulté rangés par ordre croissant. Un espace de difficulté contient donc l'ensemble des exercices possibles ordonnés selon leurs paramètres de difficulté.

La nature des dimensions de difficulté se retrouve d'un jeu à l'autre, mais leur valeur change en fonction des propriétés de la tâche. Celles que nous avons choisies modulent la difficulté du traitement visuel à réaliser pour réussir le jeu, à savoir :

- longueur et complexité des stimuli-cibles,

- similarité visuelle entre stimuli-cibles et stimuli-distracteurs,
- nombre des stimuli présents dans une vague.

### 5.3.0.1 Longueur et complexité des stimuli-cibles

S'il est admis que sous contrainte les séquences de lettres peuvent induire un traitement parallèle des lettres, une lettre seule peut aussi induire un traitement parallèle au niveau des traits qui les composent (LaBerge & Samuels, 1974). Par ailleurs, plus l'objet à traiter est complexe, plus il mobilise les capacités attentionnelles des participants (Khan et al., 2016).

Les capacités de traitement parallèle de nos jeunes participants n'excédant pas des séquences de 5 lettres (Bosse & Valdois, 2009), les stimuli présentés dans la section 3.3.2 ont une longueur qui va de 1 à 4. Pour proposer 6 valeurs de difficulté, nous avons dû adjoindre à la longueur une autre propriété à faire varier. Ces propriétés sont en l'occurrence la présence de « flankers » à gauche et à droite des stimuli-cibles et des stimuli-distracteurs, et la fréquence des stimuli cibles.

L'ajout de flankers suffisamment complexes induit du crowding et interfère avec l'analyse visuelle de l'item qu'ils entourent. Nous avons choisi d'utiliser le caractère #. Nous avons composé les crans de difficulté suivants pour l'Attrape-Lettre et l'Omelette : 1 #1# 2 #2# 3 #3#, le chiffre indiquant la longueur de la séquence, #.# indiquant la présence de flankers. Nous avons jugé #N-1# plus facile à identifier que N.

La fréquence d'une séquence de lettre joue sur la vitesse à laquelle celle-ci est reconnue. C'est vrai pour les mots (Sears, Sears, Hino, & Lupker, 1995), voire même pour les lettres seules (New & Grainger, 2011). Nous avons définis les crans de difficulté suivants pour la Forêt en T et la Tour des lettres : 2f 2nf 3f 3nf 4f 4nf, le chiffre indiquant la longueur de la séquence, « f » indiquant un stimulus fréquent et « nf » un stimulus peu fréquent.

### 5.3.0.2 Similarité visuelle

La similarité visuelle entre stimuli-cible et distracteur diminue la la vitesse des sujets en recherche visuelle (Duncan & Humphreys, 1989). Plus les items sont similaires, plus le sujet doit analyser finement chaque item pour l'identifier, plus les ressources attentionnelles nécessaires pour réaliser la tâche sont grandes (Treisman & Gelade, 1980).

Les stimuli-distracteurs présentés dans la section 3.3.2 ont été générés à partir de règles qui jouent sur leur similarité visuelle avec le stimulus-cible auquel ils correspondent. Chaque stimulus-cible a donc 6 distracteurs de similarité croissantes, qui correspondent à nos 6 crans de difficulté.

Tous nos jeux utilisent les mêmes listes de distracteurs et ont donc les mêmes crans de difficulté pour cette dimension.

### 5.3.0.3 Nombre des stimuli simultanément présents

En tâche de recherche visuelle, hormis cas d'un stimulus très semblable à son environnement, le nombre de stimuli simultanément présent allonge la durée de réalisation de la tâche. Encore une fois, ce paramètre de difficulté influence la quantité de ressources attentionnelles nécessaires pour mener à bien la tâche (Treisman, 2006).

Etant donné que nos jeux séquentent différemment les événements qui les composent, ce paramètre a été défini spécifiquement pour chacun d'entre eux.

Dans l'Attrape-Lettre, cette dimension prend la forme d'un quadruplet composé du nombre total d'emplacements possibles pour une page dans une vague(10-13-16-19-22-25),

de la vitesse de défilement du décor (unité arbitraire : 0,8-0,85-0,9-,95-1-1,05), du nombre de pages qui correspondent au stimulus-cibles (5-6-8-9-11-12), et du nombre de pages différentes du stimulus-cible (5-7-8-10-11-13).

Dans la Forêt en T, elle est quintuplet composé du nombre d'avancées de caméra au sein d'une vague, du nombre total de déplacement de fantomes pendant une vague (18-20-21-22-23-24), la durée d'affichage d'un couple (4-4-3-3-3-2-2), du nombre total de fantomes d'une même vague (16-18-19-21-22-24), du nombre de fantômes qui correspondent au stimulus-cible (2-2-2-2-3-3) et du nombre de fantomes qui ne lui correspondent pas (1-2-2-2-2-3).

Dans la Tour des lettres, cette dimension est un couple composé du nombre de portes simultanément présentes à chaque écran (4-5-6-7-8-9) et du nombre de changement d'étage dans une vague (3-3-4-4-5-6).

Dans l'Omelette, cette dimension est un triplet composé du nombre total de déplacements des oeufs d'oeuf(25-25-24-24-23-23), du nombre d'oeufs qui correspondent au stimulus-cible (2-2-2-3-3-3) et du nombre d'oeufs qui ne lui correspondent pas (1-2-2-2-2-3).

## 5.4 Choix des stimuli

### 5.4.1 Justification de nos choix

Étant donné que nos jeux incluent des tâches d'identification, il nous faut choisir précautionneusement les stimuli utilisés afin de ne pas excéder la limite de l'empan mémoriel. La taille de ce dernier varie en fonction de la familiarité du sujet vis-à-vis des stimuli. Par exemple, les performances d'empan mémoire sont meilleures pour un alphabet familier que pour un alphabet inconnu, et ce, même lorsque les participants sont entraînés sur l'alphabet inconnu jusqu'à ce qu'ils aient des performances en identification de lettre équivalentes à celles observées pour l'alphabet familier (Pelli et al., 2006).

Si nous avons choisi de cibler uniquement l'empan visuo-attentionnel des élèves, nous aurions pu utiliser des lettres inconnues afin d'augmenter la difficulté du traitement perceptif et le besoin de disposer de grandes ressources attentionnelles. Des entraînements qui incluaient peu de stimuli verbaux connus des participants ont fait leur preuve auprès d'enfants dyslexiques présentant un empan visuo-attentionnel déficitaire (Zoubrinetzky, 2015). Nous aurions donc pu choisir des pseudo-lettres ou des formes géométriques quelconques si notre objectif n'avait été que d'entraîner l'empan visuo-attentionnel. Cependant, l'utilisation de notre jeu est aussi l'occasion de consolider la représentation orthographique des unités sous-lexicales pertinentes en français (Dehaene et al., 2005). Pour cette raison, nous avons choisi de n'utiliser que des stimuli verbaux dans Evasion. Faire de lettres et de séquences de lettres les éléments de la scène visuelle à traiter en priorité mobilise les facultés de reconnaissance des stimuli verbaux des enfants. L'utilisation de stimuli verbaux dans un contexte de jeu vidéo et non de « lecture » permettrait peut être de contourner les préjugés des enfants des élèves en difficulté sur les tâches scolaires.

En effet, certains élèves de CP les plus en difficulté peinent déjà au niveau de la connaissance des lettres seules. C'est d'autant plus vrai chez les enfants issus de milieux défavorisés (Bowey, 1995). Notre population étant composée de 730 enfants tout venant, nous nous attendons à ce qu'elle inclut inmanquablement une certaine proportion d'enfants en difficulté sur le traitement des lettres isolées. Cette compétence étant la première étape incontournable de l'apprentissage de la lecture, de telles performances les empêchent de bénéficier des enseignements du CP, dédiés aux étapes ultérieures de décodage. C'est pour cela que notre jeu comporte des tâches qui leur sont accessibles et dont l'objectif nécessitera d'analyser

visuellement des lettres seules. Proposer des stimuli constitués de lettres isolées permet aussi de mobiliser un traitement visuo-attentionnel parallèle des traits qui les composent (LaBerge & Samuels, 1974 ; Mcclelland, Mirman, & Bolger, 2014).

Les élèves plus avancés auront quant à eux besoin de consolider leur représentation orthographique des séquences de lettres de la langue française et ainsi d'accélérer leur reconnaissance visuelle. Nous leur proposons ainsi des tâches où ils devront les analyser sous contrainte de temps. Pour ne pas se contenter de consolider uniquement les unités présentées mais aussi entraîner en lui même le processus d'analyse visuelle d'unités verbales complexes, nous avons imposé une certaine variété à nos stimuli. Nous avons donc choisi un nombre suffisamment important de stimuli, dont nous avons fait varier la casse, la taille et la fréquence lexicale.

## 5.4.2 Présentation des stimuli

Les stimuli se répartissent en deux groupes : les stimuli-cibles que l'élève devra chercher et identifier, et les stimuli-distracteurs parmi lesquels ils se cachent.

### 5.4.2.1 Présentation des stimuli-cibles

Les stimuli-cibles sont des unités sous-lexicales dont la taille varie de 1 à 4 lettres. Pour les unités de taille 1, nous avons pris les 26 lettres de l'alphabet.

Pour les stimuli plus longs, 6 listes de séquences de lettres ont été créées à partir de la base de données LEXIQUE 2, en modulant leur taille et leur fréquence. Nous avons équilibré leurs caractéristiques phonologiques : « type » de syllabe (CV, VC, CVC, VCV, etc.), type de phonèmes consonantique (occlusives, fricatives, labiales, etc.). Nous avons ainsi :

- une liste de bigrammes avec des lettres fréquentes (fréquence de type > 13 000 ; 6 VC (par exemple, « an »), 2 VV (par exemple, « oi »), 16 CV (par exemple, « pa »), et le graphème « ch »),
- une liste de bigrammes peu fréquents (fréquence de type < 12 000 ; 4 VC, 3 VV, 15 CV, 1 CC),
- une liste de syllabes à trois lettres fréquentes (fréquence de type » 1 000 ; 8 CVV, 5 CCV, 2 VCV, 7 CVC, 3 VVC),
- une liste de trigrammes peu fréquents (fréquence de type < 1 000 ; 8 CVV, 7 CCV, 1 VCV, 9 CVC, 0 VVC),
- une liste de syllabes à quatre lettres fréquentes (fréquence de type > 1 000 ; 8 CVVC, 1 CCVV, 1 CVVV, 1 CCVC),
- une liste de syllabes à quatre lettres peu fréquentes (fréquence de type < 1000 ; 4 CVVC, 4 CCVV, 1 CVVV, 2 CCVC).

Ces syllabes ont été choisies dans les listes de la base de données Lexique 2 (New, Pallier, Ferrand, & Matos, 2001). La fréquence type d'une syllabe correspond au nombre de mots du corpus de Lexique 2 dans lesquels elle apparaît. Un compromis a dû être trouvé entre la souplesse de nos seuils de fréquence et l'équilibre « phonologique » de nos listes. La liste de syllabes de taille 2 et peu fréquentes ne compte que 23 syllabes. En effet, nous n'avons pas trouvé de syllabes VC pertinentes répondant à nos critères, aussi nous avons préféré réduire le nombre de séquences et les répéter plus souvent. Les listes de syllabes de taille 4 sont volontairement réduites : étant donné leur rareté, nous avons préféré en sélectionner un petit nombre qui seront présentées plus souvent. La liste des syllabes utilisées par notre jeu est données en Annexe

Lettre	D
5	KWZVS
4	LANMI
3	YXJHF
2	TCUER
2	GQOPB

**TABLEAU 5.1** – *Lettres de l’alphabet ordonnées par similarité croissante avec la lettre D. La lettre B est la plus similaire, la lettre K la plus différente.*

#### 5.4.2.2 Présentation des stimuli-distracteurs

Pour chacun de nos stimuli-cibles, nous avons généré des stimuli-distracteurs en jouant sur leur similarité visuelle. Nous avons pour cela utilisé une matrice de confusion générée par nos soins à partir de plusieurs matrices de confusion existant dans la littérature. Une matrice de confusion donne pour chacune des lettres un score reflétant la similarité avec les autres lettres de l’alphabet. Les matrices de confusions que nous avons utilisées ont été générées expérimentalement, par exemple, en dénombrant les confusions qu’ont faites les participants alors qu’ils devaient reconnaître une lettre visuellement dégradée ou en évaluant la similarité de deux lettres présentées rapidement à la suite l’une de l’autre.

Ces matrices présentent des limites. En effet, en condition de présentation normale, un lecteur expert reconnaît parfaitement chaque lettre de l’alphabet. Pour contourner cet effet plafond, les expérimentateurs provoquent artificiellement des erreurs chez les participants en dégradant visuellement les lettres. Que ce soit par ajout de bruit ou par forte contrainte de temps, les informations visuelles utilisées par les participants pour identifier les lettres ne sont pas nécessairement les mêmes qu’en condition de lecture classique.

Pour atténuer ce « bruit », nous avons choisi de construire une matrice qui moyenne les confusions de plusieurs matrices de référence. Ce processus fait ainsi ressortir les similarités de chacune des matrices en atténuant leurs différences. Nous avons choisi des matrices obtenues chez l’adulte, à savoir celles de Boles et Clifford (1989), de Geyer (1977), et de Simpson, Mousikou, Montoya, et Defior (2012) pour les minuscules et Mueller et Weidemann (2012), de Townsend (1971), Boles et Clifford (1989) et Simpson et al. (2012) pour les majuscules. Les polices utilisées ne présentent pas de différences majeures (comme un a et « a en attaché »). Le contenu de chaque matrice n’étant pas exprimé dans la même unité (nombre de confusions pour l’une, probabilité de confusion pour une autre, etc.) nous les avons transformées de manière à ce qu’elles contiennent toutes des « rangs » de similarité. Les rangs de similarités vont de 1 à 26 et ordonnent, pour une lettre donnée, toutes les lettres en similarité décroissante. Ainsi, la diagonale de cette matrice contient tous les 1, chaque lettre doit être la plus similaire à elle-même. Nous avons choisi de calculer les rangs sur les lignes des matrices, ainsi, chaque ligne contient une seule fois chaque chiffre de 1 à 26.

Les matrices moyennes obtenues pour les majuscules et les minuscules sont décrites en Annexe A. À partir de ces deux matrices, nous avons constitué, pour chaque lettre, 5 listes de stimuli-distracteurs, correspondant aux 5 quintiles rangés par ordre de similarité croissante. L’exemple présenté au Tableau 5.1 correspond aux quintiles obtenus pour la lettre majuscule « D ».

Pour générer les stimuli cibles composés de plusieurs lettres, nous avons dû élaborer un ensemble de règles dont l’application dépend des propriétés de la séquence cible. Le lecteur trouvera une description de ces règles de génération à l’Annexe B.

Certaines exceptions ont été faites à ces règles quand les distracteurs obtenus étaient des séquences illégales, ou non-mots, en français. Par exemple, pour la syllabe CHOU, nous aurions obtenu en difficulté 2 la chaîne de lettres GHQJ. Or les non mots ne sont pas traité de la même manière que les pseudo-mots : les régions cérébrales de la VWFA ne sont pas activées par la présentation de non-mots (Ziegler, Besson, Jacobs, Nazir, & Carr, 1997), et les lettres sont plus difficiles à identifier au sein d'un non-mot que d'un pseudo-mot (Baron & Thurston, 1973 ; Krueger, 1975). Les tableaux qui contiennent les distracteurs de tous nos stimuli-cibles majuscules et minuscules se trouvent en Annexe C.

#### RÉSUMÉ DU CHAPITRE 5

Quels sont les choix qui ont guidé la conception d'Evasion logiciel d'entraînement des dimensions de l'attention visuelle impliquées en lecture ? Voici les réponses qu'apporte ce chapitre :

- Evasion est logiciel d'entraînement développé sur iPad Air 2, composés de 4 mini-jeux. Multiplier les mini-jeux permet de diversifier les supports d'entraînement et de limiter la lassitude induite par un entraînement de plusieurs heures.
- Les tâches que nous avons sélectionnées s'inspirent de celles présentes dans les entraînements dont l'effet sur l'attention visuelle et les performances en lecture, à savoir : identification, recherche visuelle et comparaison de séquence. Ces tâches constitueront le coeur des mécanismes de nos différents mini-jeux.
- Les tâches à effectuer dans nos 4 mini-jeux sont basées sur le même principe : une séquence de lettres est présentée en début de jeu puis disparaît, laissant place à de nouvelles séquences de lettres. L'élève doit retrouver parmi celles-ci celles qui correspondent à la séquence présentée en début de jeu.
- Nous avons ludifié ces tâches en leur conférant les propriétés des jeux vidéo d'action, à savoir : haute vitesse, alternance entre une analyse locale/globale de la scène visuelle, imprévisibilité spatiale et temporelle, et forte charge perceptive, cognitive et motrice.
- Les séquences de lettres que nous avons choisies sont des séquences prononçables dont nous avons fait varier la fréquence. Les avoir intégrées dans nos jeux nous permettra par exposition répétée de renforcer leur représentations orthographiques.
- Nous avons ajouté à Evasion un algorithme d'adaptation de la difficulté, et avons donc défini 3 dimensions de difficulté par mini-jeu. Les deux premières sont communes à tous les mini-jeux et concernent la longueur des séquences à traiter et la similarité des distracteurs qui leur seront associés. La troisième dimension est propre à chaque jeu et caractérise la vitesse et la densité des séquences présentées.

Ces différents points sont cohérents avec le cadre théorique développés dans les chapitres 2, 3 et 4. Nous espérons donc qu'Evasion améliorera la quantité de ressources attentionnelles disponibles  $Qa$  et leur dispersion dans l'espace  $\sigma$ .



# Chapitre 6

## Parseval, un algorithme d'adaptation de la difficulté inspiré de la psychométrie adaptative

Les mini-jeux d'Evasion ont des propriétés qui, combinées, font varier la difficulté d'une même tâche. Pour correspondre aux besoins de chaque enfant, il faut intégrer à Evasion un système qui permette de moduler la difficulté du jeu de manière automatique, sans avoir recours à la supervision d'un enseignant. C'est pour cela que nous avons adjoint à Evasion, un algorithme probabiliste d'adaptation de la difficulté en fonction des performances de l'élève, appelé Parseval, dont les bases ont été posées dans (Diard, Lobier, & Valdois, 2010).

Dans ce chapitre, nous présenterons d'abord les algorithmes d'adaptation de la difficulté existants et leur limites, qui nous ont amené à utiliser Parseval puis, nous détaillerons ensuite son fonctionnement et le modèle sur lequel il repose.

### 6.1 État de l'art

#### 6.1.1 Périmètre considéré

La difficulté d'un jeu a un impact sur la qualité de l'apprentissage de l'utilisateur, c'est-à-dire sur l'amplitude de l'amélioration des performances avant et après entraînement (Sampayo-Vargas, Cope, He, & Byrne, 2013), sur le maintien de cette amélioration à long terme (Choi, Qi, Gordon, & Schweighofer, 2008) et sur la généralisation de cette amélioration à d'autres tâches (Ahissar & Hochstein, 1997). Des algorithmes spécifiques ont donc vu le jour pour mesurer les performances des utilisateurs, afin d'adapter les propriétés de la tâche d'entraînement et maintenir la difficulté de celle-ci à un niveau supposé optimal pour l'apprentissage de l'utilisateur. Même si les algorithmes à visée pédagogique seront notre principal objet d'intérêt dans ce chapitre, il faut savoir que les algorithmes d'adaptation de la difficulté sont aussi étudiés dans d'autres domaines de recherche :

- la psychométrie, où l'objectif est d'obtenir rapidement des informations sur les capacités des sujets dans des tâches sensorielles ou motrices,
- le divertissement, où l'objectif est d'améliorer l'expérience et le plaisir des utilisateurs de jeux vidéo.

Nous mentionnerons certains algorithmes de psychométrie adaptative pour les besoins de notre propos, mais nous ne présenterons pas les algorithmes d'adaptation de la difficulté

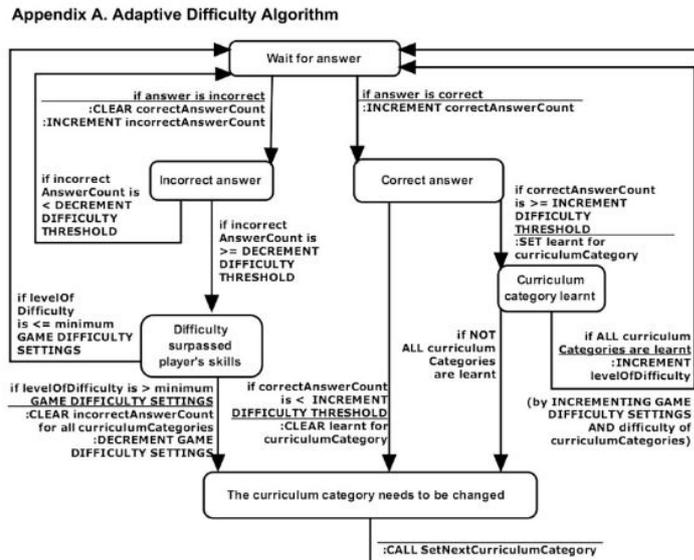


FIGURE 6.1 – Déroulement de l’algorithme de Sampayo-Vargas et collaborateurs. Tiré (Sampayo-Vargas et al., 2013).

pour le divertissement, étant donné la différence de contexte et de cas d’applications de ce domaine (Dynamic Difficulty Adjustment ; Chen, 2006).

Parmi les algorithmes d’adaptation de la difficulté pour l’éducation, il faut distinguer les algorithmes d’adaptation inter-exercices et les algorithmes d’adaptation intra-exercices. Les premiers proposent de nouveaux exercices, impliquant des tâches d’entraînement différentes, en fonction des compétences supposées maîtrisées par l’utilisateur. Les seconds, au contraire, modifient les paramètres d’une même tâche au fur et à mesure de son déroulement en fonction des performances de l’utilisateur à celle-ci. Dans le cadre de ce chapitre, nous ne considérerons que les algorithmes d’adaptation intra-exercice. Un algorithme de ce type comprend généralement deux étapes :

- l’estimation du niveau de performance de l’utilisateur en fonction de ses résultats précédents,
- la modification des paramètres de la tâche, pour répondre à une contrainte fixée par le concepteur, en fonction de l’estimation du niveau de performance de l’utilisateur.

Ces étapes serviront de grille de lecture pour la suite de ce chapitre.

### 6.1.1.1 Algorithmes d’adaptation de la difficulté à visée éducative

A notre connaissance, rares sont les algorithmes d’adaptation de la difficulté à visée éducative à avoir été implémentés dans des logiciels éducatifs et comparés à d’autres modes de gestion de la difficulté : nous n’avons recensé que 3 études de ce type. Toutes appliquent la même méthode d’ajustement à des tâches différentes, telles que l’apprentissage des suffixes espagnols (Sampayo-Vargas et al., 2013), l’entraînement à la réalisation de missions militaires simulées (Orvis, Horn, & Belanich, 2008) et la résolution d’équations du premier degré (Kalyuga & Sweller, 2005). L’algorithme mesure le nombre de réussites et d’échecs successifs, compare les performances à un seuil de référence fixé en amont, et ajuste la difficulté en fonction (pour un exemple d’implémentation, voir Figure 6.1). Le valeur du seuil utilisé dépend de la tâche considérée et est fixée par le concepteur. Même si dans ces études plusieurs facteurs de la tâche contribuent à sa difficulté, celle-ci est mono-dimensionnelle :

l'algorithme ne fait varier qu'un seul entier, qui correspond à un vecteur de valeurs fixes sur chacune des dimensions de difficulté. En d'autres termes, la difficulté est augmentée ou diminuée simultanément sur toutes les dimensions de difficulté.

Deux de ces études ont trouvé que les algorithmes d'adaptation de la difficulté avaient un effet positif sur l'apprentissage et que le gain était supérieur à celui d'un mode d'augmentation incrémental prédéfini de la difficulté (Kalyuga & Sweller, 2005 ; Sampayo-Vargas et al., 2013). La troisième étude n'a pas trouvé d'effet par rapport à une gestion de la difficulté non adaptative, mais en a trouvé un dans une duplication ultérieure (Bauer, Brusso, & Orvis, 2012) sur certains types de participants.

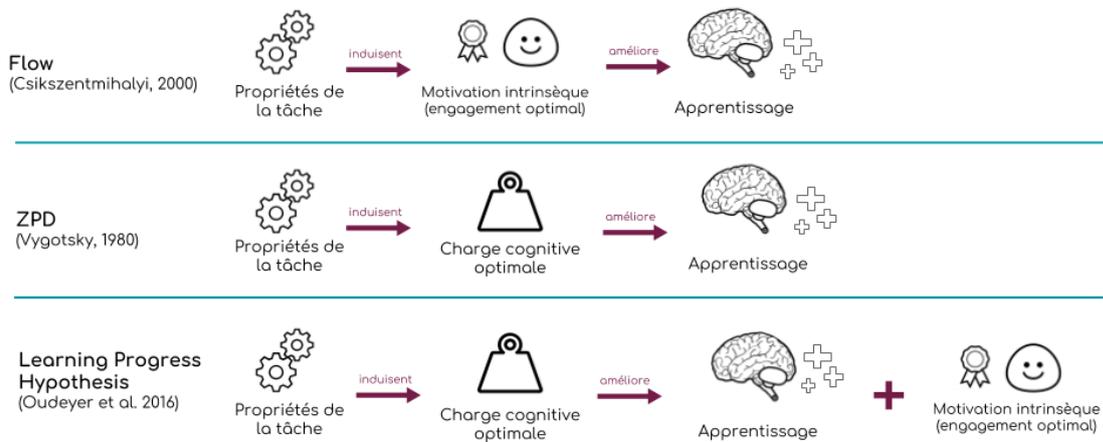
### 6.1.2 Limites des algorithmes actuels

En l'état, les algorithmes d'adaptation de la difficulté dont l'impact sur l'apprentissage a été démontré sont assez simples : leur estimation des performances de l'utilisateur ne prend en compte que les derniers essais, la consigne de sélection des exercices est difficilement interprétable vis-à-vis d'un objectif de réussite à atteindre, leur cadre n'est pas applicable à toutes les tâches, ils ne permettent pas de modifier indépendamment plusieurs paramètres de difficulté. D'autres méthodes plus sophistiquées existent (Janssen, Neerincx, & van der Wal, 2011 ; Klinkenberg, Straatemeier, & Van Der Maas, 2011 ; Pedersen, Togelius, & Yannakakis, 2010 ; Schadenberg, Neerincx, Cnossen, & Looije, 2016 ; Wilson et al., 2006) et répondent partiellement à ces différentes limitations, mais leur impact sur l'apprentissage n'a pas été comparé avec d'autres modes de gestion de la difficulté. De plus, les cadres théoriques sur lesquels tous les algorithmes mentionnés précédemment s'appuient n'ont pas fait l'objet d'une modélisation computationnelle, ce qui les rend difficiles à éprouver. En effet, les choix théoriques qui ont guidé la conception des algorithmes d'adaptation de la difficulté s'appuient en majorité sur deux théories : le « Flow » (Csikszentmihalyi, 2000) et la Zone Proximale de Développement (ZPD ; Vygotsky, 1980).

Le Flow est l'état mental résultant d'un d'engagement optimal du sujet dans la tâche qu'il réalise. Atteindre cet état dépend des propriétés de la tâche : elle doit être suffisamment stimulante pour éviter que le sujet s'ennuie, mais pas trop exigeante pour que le sujet ne soit pas anxieux. Le Flow est utilisé pour la conception de logiciels éducatifs car la motivation serait un élément essentiel de l'apprentissage (Freeman et al., 2014 ; Ryan & Deci, 2000). Le concept de Flow a fait l'objet de nombreuses publications grand public et est cité par la quasi totalité des articles mentionnés dans cette section alors qu'à notre connaissance, aucune étude rigoureuse n'a été réalisée sur le sujet ni en neuro-imagerie, ni en psychologie expérimentale.

La deuxième théorie utilisée est celle de la Zone Proximale de Développement. Initialement, cette zone recouvrait les activités pédagogiques que l'élève était incapable de réussir sans assistance, par opposition à celles qu'il réussissait tout seul et à celles dans lesquelles il échouait, même avec assistance. Née dans le domaine des sciences de l'éducation où elle se focalisait sur la situation pédagogique et les interactions entre enseignant et élève, la ZPD a été reprise, par la suite, dans le champ de la psychologie expérimentale et étendue aux propriétés objectives de la tâche et à la charge cognitive que cette dernière impose à l'élève (Schnotz & Kürschner, 2007). Dans le domaine de l'apprentissage moteur, il existe une théorie similaire à la ZPD, appelée *optimal challenge point* (Guadagnoli & Lee, 2004).

La ZPD induirait un niveau de charge cognitive intrinsèque (c'est-à-dire propre à la nature de la tâche) supposé idéal pour améliorer les performances du sujet. De nombreuses études suggèrent qu'il existe effectivement une ZPD mais, à notre connaissance, un seul modèle

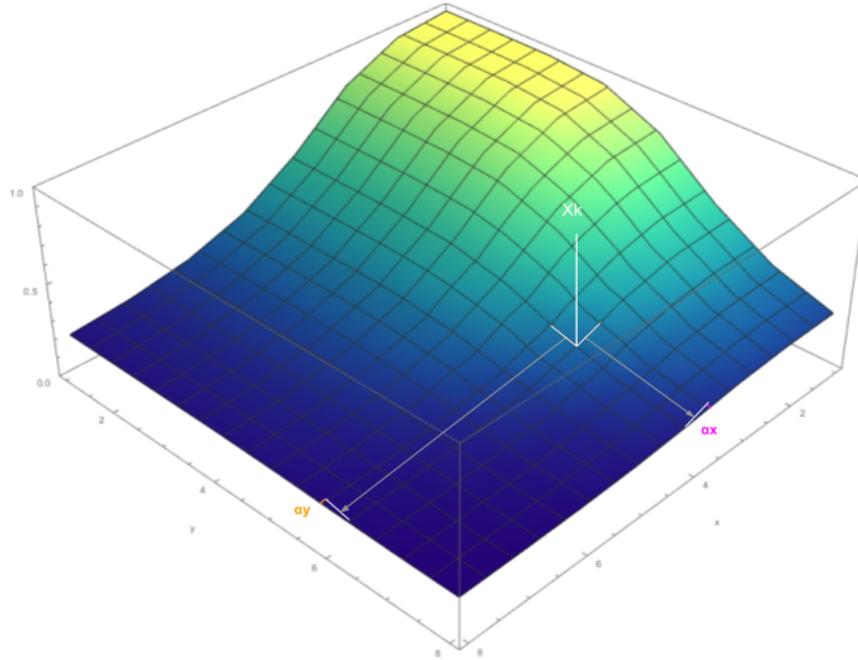


**FIGURE 6.2** – Illustration des principales théories sur l’impact de la difficulté sur l’apprentissage.

propose d’en définir les contours (Chounta, Albacete, Jordan, Katz, & McLaren, 2017). Ce modèle probabiliste a été alimenté avec les données de 15 000 élèves réalisant des problèmes de physique, donnant ainsi lieu à un modèle-élève. Leur hypothèse est qu’estimer la probabilité de réussite d’un élève à un problème de physique, calculée à partir de ce modèle-élève et des observations recueillies sur l’élève réel, permet d’approximer sa ZPD. Celle-ci serait la zone où la probabilité de réussite est de 0,5, zone où le modèle peut difficilement prédire la réussite ou l’échec de l’élève. Cette incertitude révélerait que le besoin d’assistance de l’élève est alors maximal. Pour l’instant, cette hypothèse n’est pas corroborée par une étude de l’impact pédagogique des exercices dans cette zone. De plus, l’hypothèse amalgame *a priori* la connaissance du modèle sur l’élève et la connaissance de l’élève sur l’exercice. Les seuils proposés sont donc peu satisfaisants et la ZPD doit encore être caractérisée.

Pour résumer, selon la théorie de la ZPD, une difficulté bien calibrée impose une charge cognitive idéale qui permet un apprentissage supposé optimal. Selon la théorie du Flow, une difficulté bien calibrée motive intrinsèquement l’utilisateur, ce qui le rend plus réceptif à l’apprentissage. Ces deux théories, dont ni l’une ni l’autre n’a à notre connaissance été décrite mathématiquement, peuvent en réalité être unifiées (voir Figure 6.2) par la *learning progress hypothesis* (Oudeyer, Gottlieb, & Lopes, 2016).

Cette théorie suppose que l’apprentissage est en soi une source de motivation intrinsèque pour le sujet. Le progrès constitue donc une récompense pour l’utilisateur qui le conduit à s’engager dans de nouvelles tâches susceptibles de permettre un nouvel apprentissage. Ainsi, si la tâche à résoudre a un niveau de difficulté qui améliore l’apprentissage, elle va induire chez l’utilisateur un état d’engagement optimal. Bien que plus rigoureuse que la formalisation initiale du Flow et de la ZPD et soutenue par plusieurs études (pour une revue, voir Oudeyer et al., 2016), l’application actuelle de la *learning progress hypothesis* nécessite une quantification a priori de la difficulté réalisée par un expert de la tâche à entraîner (Clement, Roy, Oudeyer, & Lopes, 2013). Elle ne permet donc pas en l’état de déterminer précisément la manière de moduler la difficulté d’un exercice de manière automatique.



**FIGURE 6.3** – *Forme mathématique et illustration d’une courbe psychométrique 2D. Le point  $x_k$  (flèche blanche sur la figure) est le point d’inflexion de la courbe,  $\alpha_x$  et  $\alpha_y$  sont respectivement les pentes au point d’inflexion selon les axes  $x$  et  $y$ .*

### 6.1.3 Apport des algorithmes de psychométrie adaptative

Les nombreuses limites des algorithmes à visée éducative semblent pouvoir être en partie dépassées par les avancées de la psychométrie adaptative. La psychométrie étudie les méthodes utilisées pour mesurer les paramètres de certains processus cognitifs. Les méthodes de psychométrie sont dites « adaptatives » lorsque les propriétés des stimuli proposés à l’utilisateur sont déterminées par les caractéristiques des stimuli précédents et la réponse du sujet à celles-ci (Leek, 2001).

Historiquement, les algorithmes issus de ce domaine sont les premiers à avoir été conçus pour adapter des tâches, les premières méthodes remontant à 1944 (Hughson & Westlake, 1944). Leur objectif est d’estimer rapidement le niveau de performance d’un utilisateur à une tâche donnée (Chang, 2015), par exemple pour discriminer un stimulus en fonction de son contraste visuel avec le fond de l’image. Ce niveau de performance dépend de la « force » du stimulus et la relation entre ces deux grandeurs est souvent représentée par une courbe psychométrique sigmoïde dont une illustration est donnée par la Figure 6.3 et une des formes mathématiques usuelles par l’équation 6.1.

$$f(x, y) = \frac{1}{(1 - e^{-\alpha_x x})(1 - e^{-\alpha_y y})} \quad (6.1)$$

Les méthodes de psychométrie adaptative ont généralement pour but de caractériser une ou plusieurs grandeurs en rapport avec cette fonction : la valeur du point d’inflexion, la pente à ce point ou les valeurs plancher et plafond. Les algorithmes de psychométrie adaptative choisissent tous les stimuli qui seront proposés au sujet de manière à estimer rapidement les paramètres de la courbe psychométrique. Ils diffèrent cependant dans leur manière d’explorer l’espace des valeurs qui peuvent caractériser les stimuli. En fonction de celles-ci, ils peuvent être séparées en trois catégories (Leek, 2001) :

- les méthodes « d'estimation des paramètres par test séquentiel » (*Parameter Estimation by Sequential Testing*, PEST) qui servent à estimer un seuil de performance en fonction des propriétés de la tâche. Ces méthodes proposent des séquences de stimuli identiques, pour lesquelles un taux de réussite est calculé. En fonction du taux estimé, une nouvelle séquence de stimuli est proposée. Le pas d'exploration de l'espace des stimuli se réduit au fur et à mesure de son exploration, jusqu'à converger vers une valeur finale, qui sera considérée comme l'estimation du seuil. Deux exemples d'algorithmes PEST sont l'implémentation décrite originellement par Taylor, Forbes, et Creelman (1983) et l'algorithme Best Pest (Lieberman & Pentland, 1982) ;
- les méthodes du Maximum de Vraisemblance (*Maximum Likelihood*), calculent à chaque pas de temps la meilleure estimation de la fonction psychométrique et ajustent l'exploration de l'espace des stimuli en fonction de celle-ci. Les principales méthodes de cette catégorie sont QUEST (Watson & Pelli, 1983) et l'algorithme  $\psi$  (Kontsevich & Tyler, 1999) ;
- les procédures dites « en escalier » (*Staircase procedure*) qui sont plus simples et peuvent s'appliquer à des configurations qui ne sont pas modélisées par une courbe psychométrique. Elles explorent l'espace des stimuli en augmentant la difficulté à chaque observation de succès et en la diminuant à chaque observation d'échec. L'étude des points de changement permet d'estimer les paramètres correspondants à un pourcentage de réussite. Deux implémentations de ces méthodes sont proposées par (Levitt, 1971)) et par (Kaernbach, 1991).

Les algorithmes d'adaptation de la difficulté présentés dans la section 6.1.1.1 sont pour la plupart des implémentations basiques d'une méthode en escalier. Le lecteur pourra trouver une discussion sur les intérêts et les limites de chaque type de méthode ainsi que d'autres exemples d'algorithmes de psychométries adaptatives dans une revue réalisée par Leek (2001).

Les méthodes modernes de psychométrie adaptative proposent des solutions aux problèmes mentionnés précédemment. En effet, certaines méthodes permettent d'estimer simultanément les paramètres de plusieurs courbes psychométriques, utilisent des outils qui améliorent la vitesse de convergence pour requérir moins d'observations expérimentales, ou proposent un cadre utilisables à plusieurs tâches (Kujala, 2011 ; Lesmes, Jeon, Lu, & Doshier, 2006 ; Watson, 2017). Peut-on pour autant les utiliser tels quels dans des logiciels éducatifs ?

A notre connaissance, seule une étude s'est intéressée à l'application d'un algorithme de psychométrie adaptative dans le domaine du contrôle moteur (Choi et al., 2008). Les participants devaient déplacer un objet pour positionner à l'écran un curseur sur une cible, la relation entre le déplacement de l'objet et celui du curseur leur étant inconnue. Les performances de l'utilisateur étaient estimées par l'écart entre la position finale de l'objet à déplacer et la cible à atteindre, grandeur qui était ensuite comparée à un écart de référence calculé lors d'un pilote. Le prochain exercice était sélectionné en soustrayant au paramètre de difficulté précédent la dérivée de l'écart de performance en fonction du temps (modélisé par une fonction exponentielle). A chaque pas de temps, la variation de la difficulté était bornée par les concepteurs pour ne pas être trop brutale. Là encore, la difficulté était monodimensionnelle. En comparaison avec une gestion de la difficulté fixe, l'algorithme permettait un meilleur apprentissage et une meilleure rétention.

La méthode d'ajustement de la difficulté utilisée par Choi et al. (2008) reste encore grossière et ne compense pas les limites des algorithmes à visée éducatives. Malheureusement, la plupart des algorithmes adaptatifs modernes ont pour but d'estimer une propriété qui est censée évoluer peu au cours de l'expérience, ce qui exclut la notion d'apprentissage. Ceux

qui font exception sont les algorithmes adaptatifs dédiés à la détection de changements, utilisées notamment pour détecter un apprentissage perceptif ou l’effet de la fatigue sur les performances du sujet. Ils comparent par exemple la réponse du sujet à la prédiction du modèle estimée sur les essais précédents (pour plus de détails, voir Leek (2001)). Cela étant dit, ils ne peuvent pas être directement utilisés pour améliorer l’apprentissage. En effet, les exercices sélectionnés par les algorithmes de psychométrie adaptative ne sont pas choisis pour maximiser l’apprentissage des utilisateurs mais pour obtenir le plus d’information possible et faire converger rapidement cette estimation. Or, la stratégie de sélection pour estimer le niveau de performance des utilisateurs n’est pas la même que celle qui améliorera leur performance plus rapidement.

#### 6.1.4 Besoin d’un nouveau modèle

Ce tour d’horizon de la littérature scientifique sur l’adaptation de la difficulté dans le domaine des logiciels éducatifs et de la psychométrie souligne le besoin d’un modèle mathématique du lien entre difficulté et apprentissage validé expérimentalement. Pour compléter judicieusement l’état de l’art, ce modèle doit proposer :

- une définition formelle et multidimensionnelle de la performance de l’utilisateur,
- un modèle de l’évolution temporelle des performances de l’utilisateur (autrement dit, de « l’apprentissage »),
- un algorithme qui se transpose facilement à d’autres tâches,
- un modèle paramétrable de sélection des exercices.

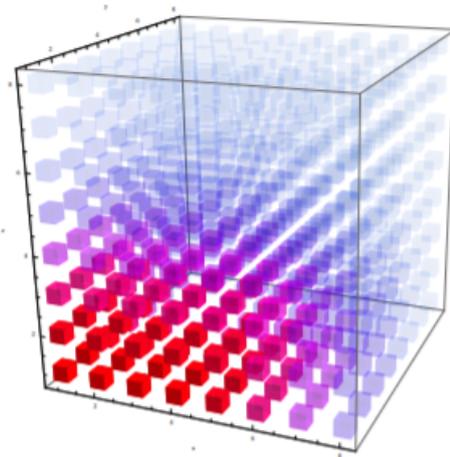
Modifiées pour qu’elles maximisent l’apprentissage des utilisateurs, les méthodes de psychométrie adaptative semblent pouvoir compenser le manque de sophistication des algorithmes actuels d’adaptation de la difficulté à visée éducative et servir de base à ce modèle.

## 6.2 Présentation de Parseval

Pour répondre à ces besoins, nous avons utilisé un modèle probabiliste bayésien d’estimation de performance de l’utilisateur et de recommandation d’exercice développé précédemment au laboratoire (Diard et al., 2010) : l’algorithme Parseval. Parseval est un algorithme probabiliste multi-dimensionnel d’estimation des performances de l’utilisateur et de sélection d’exercices en fonction de leur difficulté. Au lieu de décrire mathématiquement ce modèle, nous choisissons d’utiliser les problèmes soulevés précédemment comme grille de lecture pour présenter Parseval.

### 6.2.1 Un algorithme qui se transpose facilement à d’autres tâches

Les exercices proposés par Parseval appartiennent à un espace discret fini à  $n$  dimensions, que nous appellerons « espace de difficulté » par la suite. Chaque dimension de cet espace correspond à une propriété objective de l’entraînement. Un exercice ne prend qu’une valeur sur chaque dimension. Par convention et sans perte de généralité, nous situons les exercices les plus faciles près de l’origine, et les exercices gagnent en difficulté au fur et à mesure qu’ils s’en éloignent. Structurer l’espace de difficulté avec des dimensions orthogonales permet de prendre en compte l’influence individuelle et mutuelle de ces dimensions sur la difficulté. Ce dernier point fait de Parseval un algorithme multi-dimensionnel différent de QUEST+ qui traite séparément les dimensions utilisées (Watson, 2017). Pour pouvoir utiliser Parseval, le concepteur de logiciel doit spécifier le nombre de dimensions de l’espace, leur nature, leur



**FIGURE 6.4** – *Représentation visuelle d’un espace de difficulté tridimensionnel utilisable par Parseval. Chaque dimension est dotée de 8 crans de difficulté. Un exercice est représenté par un mini-cube de couleur. Le gradient de couleur indique la probabilité de réussite de chaque exercice, avec en rouge les exercices que le sujet est le plus susceptible de réussir et en bleu clair les exercices auxquels le sujet est le plus susceptible d’échouer.*

taille, les valeurs qu’elles peuvent prendre et ranger ces dernières par ordre croissant. Dans le cadre du logiciel Evasion, nous considérerons un espace de difficulté tri-dimensionnel (voir section 5.3). La Figure 6.4 propose une représentation visuelle d’un tel espace de difficulté tridimensionnel, pour le cas où chaque dimension a 8 crans de difficulté. Ce processus rend Parseval adaptable, en théorie, à n’importe quelle tâche d’entraînement (sans rentrer dans les détails sur les critères d’application, liés à la dépendance ou l’indépendance mathématique des dimensions considérées) et le distingue des algorithmes dont le fonctionnement dépend de la structure de la tâche à laquelle ils s’appliquent.

## 6.2.2 Une définition formelle et multidimensionnelle de la difficulté d’un exercice

La difficulté est l’effort que doit déployer l’utilisateur pour réaliser une tâche (Nicholls & Miller, 1983). Cet effort dépend d’une part des capacités des sujets, et d’autre part des propriétés objectives de la tâche (Guadagnoli & Lee, 2004). Elle peut donc être définie par la probabilité qu’un utilisateur réussisse la tâche en fonction des caractéristiques de celle-ci et des précédents résultats de l’utilisateur. Notre définition de la difficulté permet de considérer des exercices dont plusieurs propriétés contribuent à la difficulté, contrairement à la plupart des autres algorithmes qui utilisent une difficulté mono-dimensionnelle. La Figure 6.4 donne un exemple de variation de cette probabilité le long de l’espace de difficulté, avec un gradient de couleur allant du rouge pour les exercices dont la probabilité de réussite est la plus grande, au bleu clair pour les exercices dont la probabilité de réussite est la plus faible. Par convention, les exercices dont la réussite est la plus probable sont situés autour de l’origine. Cette probabilité de réussite est modélisée par une fonction psychométrique tri-dimensionnelle, dont Parseval estime les paramètres.

### 6.2.3 Un modèle de l'évolution des performances de l'utilisateur

Suite à la réalisation d'un exercice par l'utilisateur, Parseval obtient une valeur booléenne (Vrai pour une réussite, Faux pour un échec) associée à la position de cet exercice dans l'espace de difficulté. L'observation élémentaire de Parseval est donc un couple « position d'exercice, réussite/échec ». A partir d'un jeu d'observation de ce type, Parseval estime le niveau de performance de l'utilisateur, c'est-à-dire, les paramètres les plus probables de la courbe psychométrique tri-dimensionnelle. Ces paramètres, ici, sont la position du point d'inflexion, comme précédemment, mais dans un espace tri-dimensionnel. Nous notons  $K$  la position de ce point. Ce niveau de performance estimé,  $K$  permet de calculer les probabilités de réussite sur la totalité de l'espace de difficulté. L'algorithme inclut une hypothèse selon laquelle la performance de l'utilisateur évolue peu entre deux exercices. Parseval prend également en compte des connaissances *a priori* sur les performances initiales de l'utilisateur dans l'espace de difficulté : si par exemple le logiciel auquel il est intégré a pour objectif d'apprendre l'algèbre linéaire, un utilisateur titulaire d'un master de mathématique réussira probablement d'emblée des configurations que ne réussirait pas un titulaire de licence.

### 6.2.4 Un modèle paramétrable de sélection des exercices

Un terme mathématique du modèle permet de paramétrer le niveau de difficulté que nous voulons imposer à l'utilisateur, ce qui permettra à Parseval de sélectionner les exercices dont la probabilité de réussite est satisfaisante. Par exemple, si nous voulons proposer à l'utilisateur des exercices qu'il a 75% de chances de réussir, Parseval choisira dans l'espace de difficulté les configurations qui s'en approchent le plus. Avec ce paramètre, nous pouvons également configurer l'algorithme dans un mode plus « punitif », par exemple en ne fixant un taux moyen de réussite désiré qu'à 30%. Selon nous, c'est la valeur de ce paramètre qui permet de placer un exercice dans la plage de difficulté « optimale » pour l'apprentissage. Nous étudierons à la section 6.3 l'impact de ce paramètre sur la qualité de l'apprentissage.

## 6.3 Objectifs expérimentaux et protocole

Grâce à ces propriétés, Parseval nous semble être une contribution utile à l'état de l'art des algorithmes d'adaptation de la difficulté. Il nous donne de surcroît un cadre adapté pour modéliser l'impact de la modification de la difficulté en fonction des performances de l'utilisateur sur son processus d'apprentissage. En effet, nous pouvons d'une part fixer à loisir la valeur précise de la stratégie de sélection des exercices et, d'autre part, caractériser son impact sur l'utilisateur en détail grâce aux paramètres internes du modèle.

Des simulations ont permis de tester la vitesse de convergence de Parseval, c'est-à-dire la rapidité avec laquelle il propose des exercices tel que la probabilité qu'ils soient réussis par un joueur virtuel vaille 0.75, et sa réactivité, c'est à dire la rapidité avec laquelle il ajuste les exercices proposés lorsque le niveau  $K$  estimé du joueur virtuel évolue ou diminue brutalement. Les données du projet Fluence nous permettront de vérifier le bon fonctionnement de Parseval en étudiant la variation du taux de réussite le long de l'espace de difficulté (voir Chapitre 7).

**RÉSUMÉ DU CHAPITRE 6**

Pourquoi adapter la difficulté d'un entraînement aux performances du participant ? Comment fonctionne la méthode que nous avons implémentée dans Evasion ? Voici les réponses qu'apporte ce chapitre :

- La difficulté d'un jeu a un impact sur la qualité de l'apprentissage de l'utilisateur, c'est-à-dire sur l'amplitude de l'amélioration de ses performances avant et après entraînement, sur son maintien dans le temps et sa généralisation à d'autres tâches ;
- Les algorithmes d'adaptation de la difficulté qui ont montré un impact sur l'apprentissage sont très simples et ne fonctionnent qu'avec une source de difficulté unidimensionnelle. Ils font de plus référence à des théories (Zone Proximale de Développement ou Flow) qui ne sont pas suffisamment spécifiées pour être implémentées de manière exhaustive ;
- D'autres algorithmes issus de la psychométrie adaptative ont des propriétés plus intéressantes (hypothèse forte sur l'évolution des performances au cours de l'apprentissage, prise en compte d'une source de difficulté multi-dimensionnelle). Cependant leur impact sur l'apprentissage n'a pas été démontré ;
- Ces limitations imposent le recours à un nouveau modèle, qui combine les méthodes de la psychométrie adaptative et le cadre théorique des algorithmes utilisés classiquement par les éducatifs.
- Un algorithme original basé sur les probabilités bayésiennes, nommé Parseval, a ainsi été développé par Diard et al. (2010). A partir des observations des performances du joueur, celui-ci propose des exercices tirés d'un espace de difficulté multi-dimensionnel dont la probabilité que le joueur les réussisse est de 0.75. Ses propriétés permettent de surcroît de modéliser l'apprentissage du joueur au cours du temps.
- L'implémentation de cet algorithme dans une version d'Evasion a fait l'objet d'une expérimentation sur des sujets adultes. Celle-ci n'a malheureusement pas été concluante, car les configurations de difficultés possibles étaient trop faciles pour nos participants.

L'algorithme d'adaptation de la difficulté Parseval présenté ici a été intégré à Evasion, avec des espaces de difficulté tels que définis au Chapitre 5. Nous évaluerons son fonctionnement dans le Chapitre 6.

Troisième partie  
Évaluation et ajustement



# Chapitre 7

## Évaluation d'Evasion en conditions réelles : Résultats

Dans la deuxième partie de cette thèse, nous avons présenté Evasion, une application sur tablette visant l'entraînement des dimensions de l'attention visuelle impliquées en lecture. Empruntant à la fois aux tâches utilisées pour entraîner l'empan visuo-attentionnel et aux mécanismes des jeux vidéo d'action, Evasion comporte aussi un algorithme d'adaptation de la difficulté, Parseval, qui permet d'ajuster le niveau des exercices en fonction des performances de l'élève.

Dans ce chapitre, nous détaillerons la manière dont nous avons évalué l'impact d'Evasion sur l'attention visuelle et les performances en lecture. Nous décrirons d'abord nos hypothèses, la population participant au projet, le déroulement des entraînements, ainsi que la nature des données collectées. Nous expliquerons ensuite nos choix en termes d'outils statistiques d'analyse de données. Enfin, nous présenterons les résultats des analyses que nous avons effectuées. Celles-ci se sont déroulées en deux temps : nous avons d'abord testé notre hypothèse principale, puis nous avons mené des analyses supplémentaires pour tenter d'identifier les facteurs susceptibles d'expliquer l'absence d'effet d'Evasion sur l'empan visuo-attentionnel.

Nous insistons sur le fait que les analyses menées durant cette deuxième phase sont exploratoires. En effet, nous avons construit nos variables et réalisé la plupart de nos modèles a posteriori, c'est-à-dire après avoir regardé nos données. Il ne faut donc pas considérer ces résultats statistiques comme apportant des informations sur notre cadre théorique, mais comme des analyses exploratoires susceptibles d'apporter un éclairage pour guider la mise en place d'expériences supplémentaires. A ce titre, notons qu'une variante du projet aura lieu, courant 2019, dans le département de Mayotte, qui intégrera des ajustements justifiés par les résultats des analyses que nous présentons ici.

### 7.1 Méthodologie expérimentale

L'un des objectifs du projet Fluence est de tester l'impact d'Evasion sur l'empan visuo-attentionnel et l'apprentissage de la lecture suite à une utilisation du logiciel en classe. Celui-ci est comparé à Luciole, une application conçue pour entraîner la compréhension orale en anglais<sup>1</sup>. Une attention particulière a été portée lors du développement de Luciole pour éviter tout matériel écrit et ne répondre à aucun des critères des jeux vidéo d'action. Ainsi,

---

1. Luciole a été conçu par des membres du laboratoire LIDILEM (Laboratoire de linguistique et didactique des langues étrangères et maternelles - EA 609 de l'UGA ; Matthieu Loiseau, Marie-Pierre Jouannaud et Coralie Payre-Ficoud, partenaires du projet Fluence) et a été réalisé par la société Oeil pour Oeil.

Luciole a été conçu pour servir de logiciel contrôle permettant d'évaluer l'effet différentiel d'Evasion sur l'empan visuo-attentionnel et la lecture.

Notre hypothèse principale était que l'amélioration de l'empan visuo-attentionnel et des performances en lecture serait plus grande chez les élèves ayant joué à Evasion que chez ceux ayant joué au jeu contrôle. Une amélioration de l'empan visuo-attentionnel suite à l'utilisation d'Evasion était attendue, comme pré-requis démontrant que le logiciel entraînait bien ce qu'il était censé entraîner. Si l'empan visuo-attentionnel était effectivement entraîné par le logiciel, alors un transfert en lecture aurait été également prédit, et de meilleures performances auraient été prédites chez les élèves ayant utilisé Evasion comparativement à Luciole. Par ailleurs, Evasion a été conçu pour répondre aux critères des jeux vidéo d'action. Etant donné que ces jeux ont un effet sur de nombreuses fonctions cognitives (perception et fonctions exécutives, notamment) et un impact positif sur la lecture, on pouvait également s'attendre à ce qu'Evasion induise une amélioration des performances en lecture, même dans le cas où une amélioration de l'empan visuo-attentionnel n'aurait pas été observée.

Nous verrons que les résultats de l'expérimentation ne conduisent pas à valider notre hypothèse principale : aucune amélioration différentielle de l'empan visuo-attentionnel n'est observée suite à l'utilisation d'Evasion et aucun impact positif sur la lecture n'est, non plus, observé. Nous présenterons donc des analyses post-hoc afin de déterminer si certaines des variables, recueillies au cours de l'entraînement ou auprès des enseignants, offrent des pistes explicatives de cette absence d'effet. Nous avons dans ce cadre étudié :

- la qualité du respect du protocole au sein des classes,
- la durée d'entraînement totale sur Evasion et au sein de chaque mini-jeu,
- l'évolution des performances des élèves aux mini-jeux d'Evasion,
- le taux de réussite au sein des différents mini-jeux<sup>2</sup>,
- la semaine de démotivation des élèves perçue par les enseignants.

Nous vérifierons également le fonctionnement de l'algorithme d'adaptation de la difficulté Parseval, en observant l'évolution du taux de réussite et l'estimation de la performance de chaque participant dans chaque mini-jeu. En ce sens, nous nous intéresserons pour chaque mini-jeu à l'effet du taux de réussite sur l'évolution des performances de l'élève au sein de celui-ci. Enfin, nous regarderons si nos mini-jeux ont été appréciés de la même manière par tous les élèves.

### 7.1.1 Population

L'expérimentation a porté sur 730 élèves de CP rattachés à 52 classes et 35 écoles réparties dans l'ensemble des cinq départements de l'académie de Grenoble (Isère, Ardèche, Savoie, Haute-Savoie et Drôme). Le recrutement des écoles a été effectué en étroite collaboration avec le Rectorat. Celui-ci a transmis aux enseignants de l'académie un appel à manifestation d'intérêt, puis a communiqué à notre consortium la liste des établissements volontaires. Un peu plus de 70 écoles ont répondu positivement, correspondant à un nombre d'élèves très au-delà du nombre que nous pouvions intégrer dans l'étude du fait du nombre de tablettes disponibles. Nous avons bénéficié de l'aide de la SESPAG (Service d'Etudes Statistiques de la Performance et de l'Analyse de Gestion) du Rectorat de l'Académie de Grenoble afin de sélectionner des écoles représentatives de la diversité des écoles de l'académie et de la diversité des publics. Les directeurs et équipes pédagogiques des écoles pressenties ont ensuite été contactés afin de s'assurer de la qualité de leur connexion internet (nécessaire pour le

---

2. Pour rappel, Evasion inclut un algorithme d'adaptation de la difficulté, donc le taux de réussite n'indique pas à lui seul le niveau de performance d'un élève.

déploiement et la mise à jour des applications et la transmission des données d’entraînements à nos serveurs) et de l’adhésion au projet de l’ensemble des enseignants de CP, CE1 et CE2, étant donné que le projet Fluence prévoit un suivi longitudinal sur trois ans. Au final, 35 écoles ont été retenues. Des autorisations parentales ont été systématiquement demandées (voir document en Annexe) et obtenues pour les 730 élèves de l’étude.

## 7.1.2 Procédure

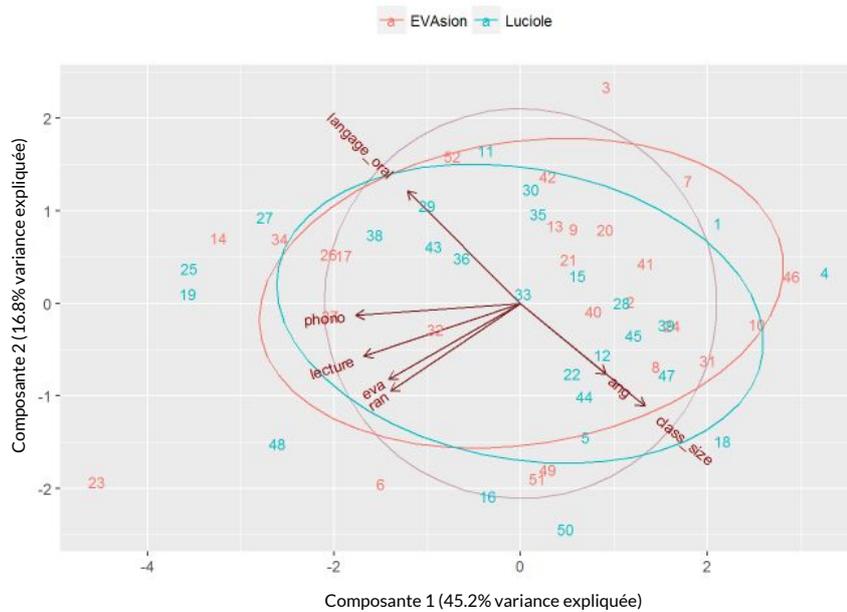
Le protocole pour l’étude menée en CP comprenait trois phases : une phase d’évaluation initiale des performances des élèves (menée en Novembre-Décembre 2017), une phase d’entraînement (de Janvier à Mai 2018) et une phase d’évaluation après entraînement (Mai-Juin 2018). Le projet Fluence a reçu un agrément de la CNIL (Commission Nationale de l’Informatique et des Libertés ; N° de déclaration : 0979176) et le protocole expérimental a été approuvé par le comité d’éthique de l’Université Grenoble-Alpes (CERNI, n° de l’avis : IRB00010290-2017-07-04-2). Les phases d’évaluation pré- et post-entraînement portaient d’une part sur les dimensions cognitives impliquées en lecture, d’autre part sur les connaissances des élèves en lecture.

### 7.1.2.1 Phase d’évaluation pré-entraînement

L’évaluation pré-entraînement comprenait des épreuves de conscience phonologique, de langage oral (niveau de vocabulaire, compréhension orale, répétition de mots et de pseudo-mots, dénomination d’images), d’empan visuo-attentionnel (report global et partiel de séquences de 4 chiffres, tâche contrôle d’identification rapide de chiffres), de dénomination rapide (RAN) et de connaissance du nom et du son des lettres. Le lecteur pourra trouver la liste des tests utilisés ainsi qu’un exemple d’item de chaque test en Annexe D.

Les données collectées auprès des élèves avant entraînement ont été analysées dans le but de constituer deux groupes d’élèves équivalents. L’objectif était de proposer les logiciels Evasion et Luciole à deux groupes d’élèves ayant des performances similaires en début d’expérimentation.

Les groupes expérimentaux ont été constitués par le statisticien du projet Fluence (Mathieu Rolland), à partir des données collectées et en tenant compte de la taille des classes. Il a pour cela utilisé la procédure de randomisation contrainte covariante implémentée dans le package R `cvcrand` et décrite par Raab et Butcher (2001). Par simplicité, tous les élèves d’une même classe devaient appartenir au même groupe expérimental (Evasion ou Luciole). L’homogénéité des groupes ainsi constitués peut être vérifiée via une Analyse en Composantes Principales (voir Figure 7.1). La Figure 7.1 montre la répartition des classes qui ont utilisé les logiciels Evasion et Luciole sur l’espace des facteurs retenus pour la classification. La quasi-superposition des deux ellipses montre que la répartition est bien équilibrée. Le groupe Evasion est constitué de 356 élèves, et le groupe Luciole de 374 élèves. Bien qu’ils n’aient pas été pris en compte pour la répartition, les critères socio-démographiques des écoles sont équilibrés (3 écoles en secteur rural et 23 écoles labellisées « Réseau d’Éducation Prioritaire » par groupe). La comparaison directe des deux groupes de classes sur l’ensemble des variables pré-entraînement montre une absence de différence significative (résultats non présentés ici).



**FIGURE 7.1** – Nuages de points projetés dans le plan factoriel de l'analyse en composantes principales menée sur les pré-tests des groupes Evasion (en rouge) et Luciole (en bleu). Chaque numéro représente une classe. Les acronymes correspondent aux différentes épreuves des pré-tests : « phono » : conscience phonologique ; « eva » : empan visuo-attentionnel ; « ran » : dénomination rapide ; « ang » : anglais.

### 7.1.2.2 Phase d'entraînement

Les élèves ont été entraînés pendant 10 semaines, à raison de 3 sessions d'entraînement de 20 minutes chacune par semaine. Les sessions devaient être réparties sur des jours différents de la semaine de façon à proposer au plus une session par jour. La durée totale d'entraînement souhaitée était de 10 heures (1 heure par semaine). Les élèves assignés au groupe Evasion pouvaient jouer au mini-jeu de leur choix parmi les quatre proposés par le logiciel. Cependant, après chaque phase de 5 mn de jeu, le mini-jeu le moins joué était systématiquement mis en valeur sur l'écran d'accueil, pour inciter l'élève à une utilisation équilibrée des quatre mini-jeux.

Les entraînements ont été conduits sur des tablettes individuelles (tablettes Ipad Air 2) pendant le temps de classe, sous la supervision des enseignants. Les enseignants ont reçu une formation de deux jours organisée par les équipes scientifiques impliquées dans le projet. Cette formation avait pour but à la fois d'explicitier les bases théoriques de la conception et du développement des logiciels d'entraînement, mais aussi de présenter les logiciels et d'insister sur les conditions de mise en œuvre en classe. L'importance de respecter et de contrôler le temps de jeu était notamment précisée. Des tableaux de répartitions idéales des 3 séances de 20 mn de jeu dans la semaine étaient fournis aux enseignants (priviliégiant un entraînement les lundi, mercredi et vendredi). Ceux-ci étaient également informés des épreuves utilisées lors des évaluations et sensibilisés à l'importance des évaluations pour la validation (ou non) des logiciels. Le but ultime de mettre à disposition des enseignants les outils validés était également annoncé.

Dans le cas d'Evasion, les enfants utilisaient les tablettes en relative autonomie mais les

enseignants pouvaient suivre les progrès de leurs élèves et la répartition des temps d’entraînement entre les mini-jeux sur une interface Web conçue à cet effet. Ces informations leur permettaient de vérifier que les élèves faisaient un travail effectif et, si besoin, d’intervenir auprès d’un élève et/ou d’ajuster la durée des séances, l’écart entre la durée d’une séance d’entraînement et le temps de jeu effectif pouvant être variable. Un poster contenant plusieurs éléments visuels d’Evasion devait être affiché dans chaque classe. Chaque élève gagnait des images à découper et à coller après chaque entraînement sur le jeu. A la fin du protocole, la totalité du poster était ainsi constituée. Dans le cas de Luciole, les élèves se voyaient proposer les exercices d’entraînement selon une progression pré-définie. Comme pour Evasion, les enseignants étaient informés sur l’interface enseignant des exercices qui avaient été joués et des progrès réalisés par l’élève.

### 7.1.2.3 Phase d’évaluation post-entraînement

Les épreuves proposées lors de l’évaluation de fin d’année en post-entraînement mesuraient les mêmes dimensions que lors de l’évaluation initiale. Les contenus des épreuves étaient différents de ceux des évaluations initiales de façon à tenir compte de la progression attendue des compétences des élèves. Comme pour l’évaluation initiale, tous les tests proposés ont été conçus pour les besoins de l’étude. Concernant l’empan visuo-attentionnel, des épreuves de report global et partiel de séquences de 5 lettres ont été proposées ainsi que l’épreuve contrôle de seuil d’identification de lettres. Le niveau de lecture des élèves était mesuré par le biais d’épreuves collectives en temps limité de décision lexicale phonologique (trouver ce qui se prononce comme un vrai mot : vardon, fenile, tampette, coiffin), de décision lexicale sémantique (trouver les noms d’animaux) et de décision lexicale orthographique (trouver la bonne orthographe : aricau, pain, balon, jamai). Des épreuves individuelles de lecture de pseudo-mots et de texte étaient également proposées ainsi qu’une épreuve informatisée visant à estimer les effets de longueur en lecture.

### 7.1.3 Nature des données collectées

Deux types de données ont été collectées :

- les données sur le niveau de l’élève avant et après entraînement, collectées durant les phases d’évaluation initiale et finale,
- les données sur le déroulement de l’entraînement, comprenant d’une part les données sur les traces des élèves collectées durant l’entraînement et les données collectées dans le cadre d’un questionnaire soumis aux enseignants.

#### 7.1.3.1 Données pré-post entraînement

Dans le cadre de cette thèse, nous ne considérons qu’une partie des données recueillies lors des évaluations initiales et finales. Nous étudierons l’évolution de l’empan visuo-attentionnel tel qu’estimé par les tâches de report partiel et global. L’évolution des performances en lecture est également mesurée de façon à estimer l’effet potentiellement différentiel de l’entraînement avec Evasion.

**Mesures de l’empan visuo-attentionnel** Pour rappel, les épreuves de report global et partiel consistent à présenter des séquences de lettres ou de chiffres en temps limité (200 ms) au centre de l’écran. En report global, on demande à l’enfant d’énoncer oralement le nom de toutes les lettres ou chiffres qu’il a pu identifier. En report partiel, une barre verticale

apparaît suite à la présentation de la séquence, indiquant la position de la lettre ou du chiffre à identifier. Lors de l'évaluation initiale, des séquences de 5 chiffres étaient présentées (par exemple, « 6 3 1 7 4 »). La tâche comprenait 20 essais successifs, soit un total de 100 chiffres à identifier. Le report partiel comprenait 50 essais correspondant à 10 chiffres cibles à identifier par position. L'évaluation post-entraînement consistait en des épreuves de report global et partiel de 5 lettres (par exemple, « R F D M S »), soit 100 lettres à identifier en report global (5x20 essais) et 50 lettres cibles (10 par position) à identifier en report partiel. Les scores d'empan visuo-attentionnel utilisés dans le cadre de cette thèse ont été obtenus en additionnant les scores aux tâches de report partiel et global, en les divisant par deux, puis en les standardisant sur l'ensemble de nos observations.

**Mesure des performances en lecture** L'épreuve de lecture de mots inventés consistait à présenter une série de 24 items (par exemple, tanole, casite) que l'enfant devait lire le plus vite possible et sans faire d'erreur. Le temps maximum accordé pour la lecture était d'une minute. Le score correspond au nombre de mots correctement lus en une minute. Dans le cadre de l'épreuve de lecture de texte, un texte de 177 mots était proposé à l'enfant qui devait le lire à haute voix jusqu'à arrêt du chronomètre au bout d'une minute. Le score correspond au nombre de mots correctement lus en une minute.

### 7.1.3.2 Données sur le déroulement de l'entraînement

Les données produites par Evasion contiennent tous les événements qui ont eu lieu pendant l'entraînement, à savoir, la liste des configurations de difficulté proposées à l'élève, un booléen marquant l'échec ou la réussite de chaque configuration, et un « timestamp » indiquant le moment où elle a été proposée. Pour pouvoir intégrer ces données dans des modèles expliquant l'évolution des performances visuo-attentionnelles suite à l'entraînement, il a donc fallu construire des variables explicatives. Ces variables peuvent être regroupées en 4 familles, qui décrivent les durées d'entraînement, les taux de réussite, les niveaux de performance, et les informations fournies par les enseignants.

**Durée d'entraînement** Nous avons calculé, à partir des données récoltées sur tablette, les temps de jeu effectif, au total et par mini-jeu. Cela indique si l'élève a bien complété l'entraînement. Ensuite, les classes du projet ayant pu éprouver des difficultés à respecter le protocole en terme de temps de jeu, nous nous sommes intéressés, pour chacune d'entre elles, à la distribution des durées totales et des durées quotidiennes d'entraînement des élèves et à la répartition de ces dernières sur les 10 semaines du protocole. Nous avons ensuite caractérisé les classes selon leur niveau de respect du protocole (bon, neutre, faible). Par ailleurs, n'ayant pas mis de contraintes fortes sur les temps passés sur chaque mini-jeu, il est possible que différents profils émergent en fonction des préférences de chacun. Pour les identifier, nous avons utilisé un algorithme de partitionnement (ou *clustering*) non supervisé, utilisant la méthode des k-moyennes, sur les proportions de temps passés sur chaque mini-jeu. Nous avons donc étudié l'impact des temps passés sur chaque mini-jeu, du respect du protocole et des régimes d'entraînement sur l'évolution de l'empan visuo-attentionnel suite à l'entraînement.

**Taux de réussite** L'algorithme d'adaptation de la difficulté Parseval implémenté dans Evasion ajuste automatiquement le niveau de difficulté des mini-jeux en fonction des performances de l'utilisateur. Il doit proposer à l'utilisateur des exercices dont le taux de réussite

estimé est de 75%. Nous avons dans un premier temps vérifié le taux de réussite moyen pour chaque mini-jeu, puis pour chaque région de l’espace de difficulté associée à chaque mini-jeu. L’objectif ici est double : évaluer le bon fonctionnement de Parseval d’une part, et la bonne définition de notre espace de difficulté, d’autre part. Cette première analyse nous indique également si on peut utiliser l’estimation du niveau de l’élève proposé par Parseval (variable  $K$ , voir ci-dessous et Section 6.2) dans la suite de nos analyses. Le taux de réussite, s’il est correctement asservi à 75% par l’algorithme, peut également refléter une définition correcte de l’espace de difficulté : nous avons donc comparé les élèves dont le taux de réussite correspond à la consigne de Parseval et les autres, au regard de leur amélioration de l’empan visuo-attentionnel entre les évaluations pré-entraînement et post-entraînement.

**Estimateur  $K$  du niveau de l’élève** Rappelons que le paramètre  $K$  est la position, estimée par l’algorithme Parseval, du point d’inflexion de la courbe psychométrique dans l’espace de difficulté.  $K$  correspond donc à une estimation du niveau de l’élève dans l’espace de difficulté d’un mini-jeu donné. Son évolution au cours du temps est censée refléter l’évolution de l’élève, et peut permettre de caractériser l’apprentissage. Nous regarderons donc s’il existe une différence entre la valeur de  $K$  estimée au début de l’entraînement et après 1 h passée sur chaque mini-jeu. Nous nous intéresserons ensuite à la relation entre l’amélioration de l’attention visuelle avant et après entraînement et l’évolution de  $K$ . Enfin, pour mieux comprendre l’impact de Parseval sur l’apprentissage, nous nous sommes intéressés à l’impact du taux de réussite des élèves sur l’amplitude de l’évolution de  $K$ .

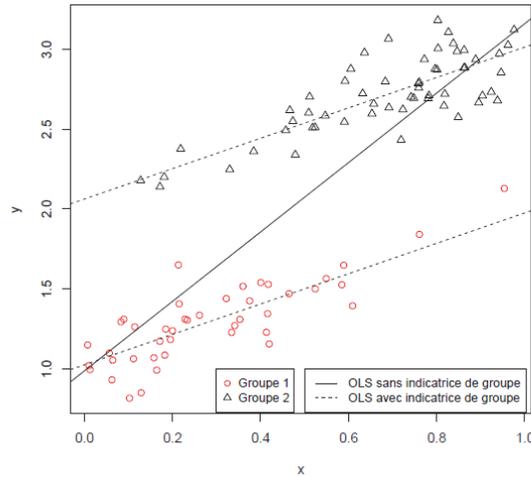
**Données du questionnaire enseignants** Un questionnaire a été conçu et distribué en fin d’entraînement aux enseignants. Celui-ci avait pour but général de recueillir les remarques des enseignants sur le déroulement du projet et sur le ressenti de leurs élèves. Dans le cadre de cette thèse, nous ne considérons que deux questions<sup>3</sup> : l’estimation des préférences des élèves vis-à-vis des différents mini-jeux, et le moment de baisse de motivation constatée au sein de la classe, le cas échéant.

#### 7.1.4 Méthode d’analyse des données

Dans ce chapitre, nous avons choisi d’utiliser des modèles statistiques multi-niveaux, aussi appelés modèles mixtes. En effet, les données collectées pendant ce projet sont structurées hiérarchiquement selon plusieurs niveaux : nous récupérons par exemple plusieurs observations sur un même participant qui, lui-même, appartient à une classe. Ces effets de contexte ont une influence sur la relation entre notre variable d’intérêt et d’autres facteurs. C’est par exemple le cas de « l’effet maître », qui peut augmenter ou diminuer l’impact d’un entraînement sur les performances de ses élèves (pour une revue, voir Bressoux & Bianco, 2004). Alors qu’il est difficile d’inclure ces facteurs, en plus d’autres variables de groupe, dans une ANOVA à mesure répétées classique, ces effets de contexte peuvent être pris en compte et estimés par les modèles multi-niveaux. Les modèles multi-niveaux sont une extension des modèles linéaires qui testent l’existence d’effets de combinaisons linéaires de covariables sur une variable d’intérêt.

---

3. Nous disposons aussi de la liste des préférences des enseignants en matière de logiciel d’entraînement avant leur rattachement à l’un des groupes expérimentaux. Cependant, parmi les enseignants rattachés à Evasion, seuls 2 (sur 26) auraient préféré entraîner leurs élèves sur Luciole. Nous n’en avons donc pas tenu compte dans notre analyse.



**FIGURE 7.2** – Illustration du biais d’agrégation lorsque la régression est effectuée sur des données non indépendantes. Les groupe 1 et 2 ne diffèrent que par leur intercept, cependant, ne pas en tenir compte revient à surestimer la pente de la régression. Tiré de (Givord & Guillerm, 2016).

Soit  $N$  le nombre d’observations collectées durant une expérience et  $(Y, X) = \{y_i, x_i\}$ ,  $i$  allant de 1 à  $N$ , les variables observées. Un modèle linéaire multivarié classique reliant ces deux variables peut s’écrire :

$$\forall i \in \llbracket 1..n \rrbracket, y_i = \alpha + \beta * x_i + \epsilon_i, \quad (7.1)$$

où  $\alpha$  est l’ordonnée à l’origine,  $\beta$  la pente et  $\epsilon_i$  le terme d’erreur résiduelle. Les coefficients  $\alpha$  et  $\beta$  de la régression représentent les contributions indépendantes des variables  $X$  à la prévision de  $Y$ . Pour rappel, pour étudier l’effet d’un groupe sur une variable, mis-à-part l’encodage des variables de groupes, la régression linéaire simple et l’ANOVA à un facteur donnent des résultats quasi-équivalents.

Une première condition d’application des régressions linéaires classiques est de supposer l’homoscedasticité des résidus. Or, dans le cas de données structurées en groupe, il est possible qu’il y ait une hétérogénéité dans la relation entre deux variables au sein du groupe. La variance des erreurs peut donc être différente pour les différents individus du groupe. Les modèles linéaires classiques considèrent que les observations sont indépendantes. Si cette hypothèse n’est pas vérifiée, la variance sera sous estimée, ce qui augmente le risque d’erreur de type 1. Or, nos données ne sont pas indépendantes, mais groupées au sein d’unités comme le participant ou la classe. Pour illustrer la variabilité de l’évolution des performances visuo-attentionnelles avant et après entraînement au sein de notre population, nous avons fait une régression linéaire simple par classe, décrite par l’équation :

$$\forall i \in \llbracket 1..n \rrbracket, eva_i = \alpha + \beta * PrePost_i + \epsilon_i, \quad (7.2)$$

où  $PrePost$  est une variable de contraste représentant la temporalité du test, qui vaut -0,5 si la mesure a été réalisée en pré-entraînement ou +0,5 si la mesure a été réalisée post-entraînement. Dans notre cas,  $\alpha$  rend compte du niveau de base de chaque classe, et  $\beta$  de la sensibilité de la classe à l’entraînement. Ces deux coefficients peuvent être variables d’une classe à l’autre, ce qui peut nuire à l’estimation de ces mêmes coefficients par une régression effectuée sur les données agrégées (voir Figure 7.2).

Les modèles multi-niveaux prennent en compte la structuration des variables en unités, en offrant la possibilité d’ajouter des termes correctifs à l’estimation des coefficients. Par exemple, si l’on a  $J$  groupes, on peut autoriser  $\alpha$  et  $\beta$  à varier en fonction du groupe. L’équation (7.1) devient :

$$\forall i \in \llbracket 1..n \rrbracket, \forall j \in \llbracket 1..J \rrbracket, y_i = (\alpha + \alpha_j) + (\beta + \beta_j) * x_i + \epsilon_i + \epsilon_j, \quad (7.3)$$

où  $\alpha_j$  et  $\beta_j$  sont des coefficients d’ajustements propres à chaque groupe, appelés « effets aléatoires », estimés directement par le modèle.

En plus de prendre en compte et d’estimer les effets aléatoires associés aux groupes, les modèles multi-niveaux ont d’autres avantages par rapport aux ANOVA à mesures répétées. En cas de données manquantes, ils permettent de maintenir le niveau de puissance statistique du test, ce qui n’est pas le cas des ANOVA à mesure répétées. En effet, si  $m$  sur  $N$  participants n’ont complété que le pré- ou le post-test, ils seront exclus de l’analyse, ce qui diminue la puissance du test. Les modèles mixtes gardent les participants qui n’ont qu’un pré-test pour estimer la moyenne du pré-test et symétriquement pour le post-test.

Dans la suite de ce chapitre, nous estimons les paramètres des modèles statistiques par la méthode de maximum de vraisemblance. Nos variables étant exprimées dans des unités différentes, nous les avons standardisées pour pouvoir comparer leur effet relatif sur la variable d’intérêt. Pour décrire les modèles que nous avons conçus, nous utiliserons la notation de Wilkinson (Wilkinson & Rogers, 1973). Sauf précision contraire dans le corps du texte, les effets aléatoires de nos modèles sont les suivants : un ajustement de l’ordonnée à l’origine par participant pour prendre en compte son niveau initial, un ajustement de l’ordonnée à l’origine et de la pente par classe pour prendre en compte le niveau de la classe et sa sensibilité à l’entraînement. Nous avons systématiquement vérifié les conditions d’application des modèles linéaires mixtes, à savoir la normalité des données et des résidus (vérifiée par un test de Shapiro-Wilks) ainsi qu’un test de linéarité. Si le résultat de ces tests n’est pas mentionné dans le texte, c’est que ces hypothèses sont validées.

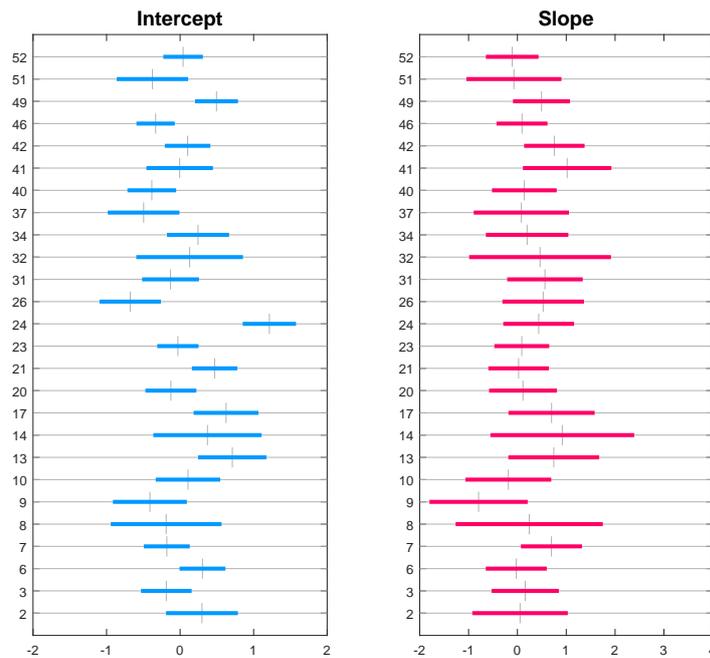
Lorsque l’une des variables de la combinaison linéaire est une variable de groupe, une ANOVA de type 3 (avec une méthode d’approximation des degrés de liberté de Satterthwaite) est utilisée pour estimer l’effet de toutes ses modalités ajusté par rapport aux autres variables de la combinaison linéaire. L’ensemble de nos analyses a été réalisé sous Matlab R2015b, en utilisant la toolbox `Statistics and Machine learning`.

## 7.2 Résultats

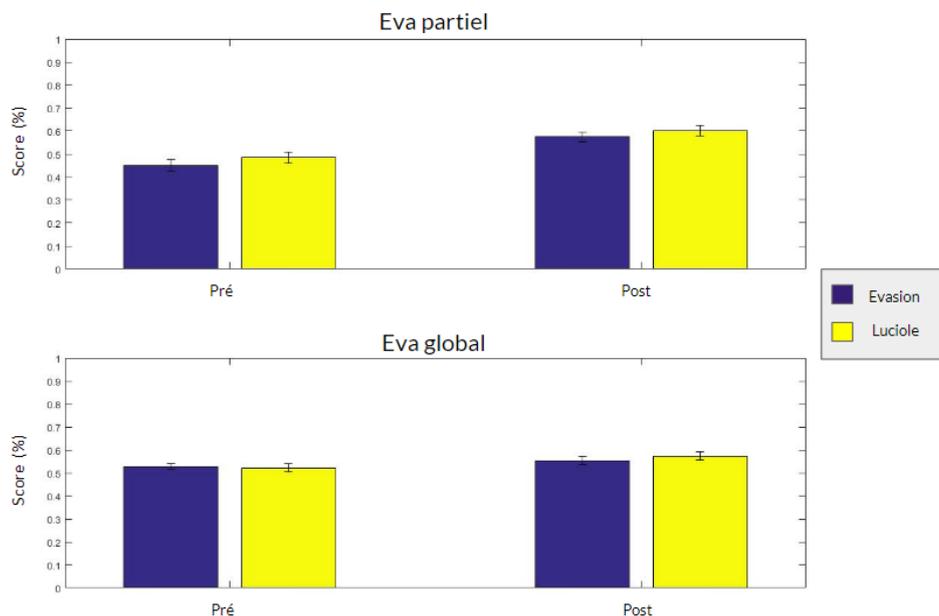
### 7.2.1 Comparaison de l’évolution de l’empan visuo-attentionnel entre les élèves ayant joué à Evasion ou à Luciole

Nous avons tout d’abord effectué une régression linéaire ordinaire pour chacune des classes pour expliquer l’effet de la temporalité du test (pré ou post-test) sur les performances d’empan visuo-attentionnel. La Figure 7.3 montre pour chacune des classes l’ordonnée à l’origine, qui indique le niveau initial de la classe, et le coefficient d’accroissement du score, qui reflète la sensibilité des classes à l’entraînement. La variabilité des ces deux valeurs pour chaque classe conforte notre choix d’utiliser des modèles multi-niveaux.

Nous avons donc fait la même analyse, en utilisant un modèle multi-niveaux (nommé modèle 0) qui prend comme effet fixe la temporalité du test, ainsi qu’une interaction entre celle-ci et le jeu utilisé (Luciole ou Evasion). En effet aléatoire, nous avons autorisé l’effet de



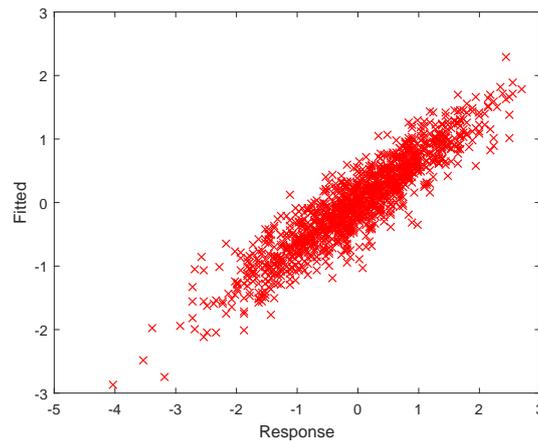
**FIGURE 7.3** – Estimation des ordonnées à l'origine (à gauche, en bleu) et des pentes (à droite, en rose) des régressions linéaires réalisées pour chaque classe. Chaque ligne correspond à une classe, et la largeur des bandes de couleur représente l'intervalle de confiance à 95%. La régression explique le score d'empan mesuré en fonction de la condition pré ou post.



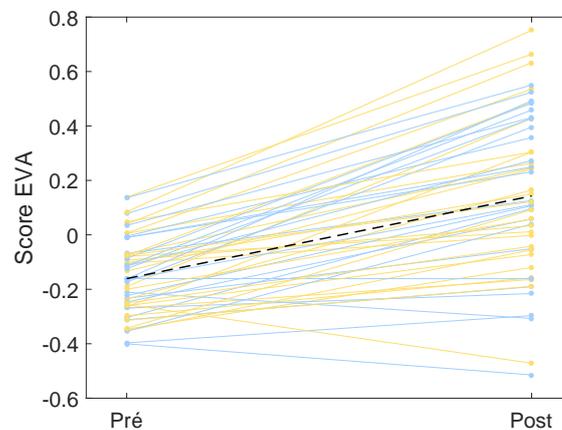
**FIGURE 7.4** – Evolution des taux de performances en tâche de report partiel (en haut) et global (en bas) pour les élèves ayant joué à Luciole (en jaune) et ceux ayant joué à Evasion (en violet). En ordonnées, se trouve le taux de performance à ces tâches. En abscisse se trouve la temporalité du test (pré ou post-entraînement).

la temporalité du test à varier par classe et l'intercept à varier par classe et par participant. Les coefficients des effets fixes sont présentés en Annexe dans le Tableau E.1.

Seul le paramètre pré-post test a un effet significatif sur la variable score ( $\beta = 0.30, CI_{95} =$



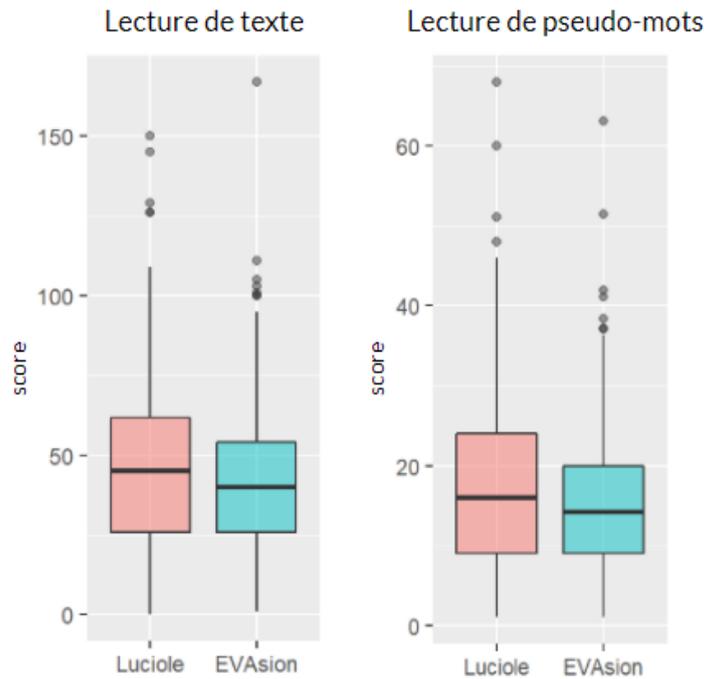
**FIGURE 7.5** – Prédiction des scores d’empan visuo attentionnel par le modèle 0 (en ordonnée) par rapport aux observations réelles (en abscisse). Les points sont quasiment alignés sur la diagonale  $f(x) = x$ .



**FIGURE 7.6** – Modélisation de l’évolution de l’empan visuo-attentionnel avant et après entraînement pour les classes ayant joué à Evasion (en jaune) et celles ayant joué à Luciole (en bleu). La ligne pointillée noire montre l’estimation du modèle via les effets fixes seulement, sans correction par classe.

[0.15; 0.44],  $F(1, 1250) = 16.7, p < 0.001$ , voir Figure 7.4). Tous groupes confondus (Luciole et Evasion), on observe une augmentation du taux de performance sur les épreuves d’empan visuo-attentionnel entre les évaluations initiales et finales ( $M_{pré,partiel} = 0.46, (std = 0.15)$ ;  $M_{pré,global} = 0.52, (std = 0.10)$ ;  $M_{post,partiel} = 0.57, (std = 0.12)$ ;  $M_{post,global} = 0.53, (std = 0.12)$ ). Une ANOVA suggère que les performances en tâche de report se sont améliorées ( $F(1, 1312) = 178.34, p < 0.001$ ), mais pas les performances en tâche de report global ( $F(1, 1252) = 1.57, p = 0.21$ ). L’interaction entre la temporalité du test et le jeu utilisé n’est pas significative ( $F(1, 1250) = 4.17, p = 0.51$ ) : l’empan visuo-attentionnel des élèves de notre population a donc augmenté de la même manière, quel que soit le jeu auquel ils ont été entraînés (voir en Annexe le Tableau E.1). L’augmentation de l’empan visuo-attentionnel dans notre population au cours de ces 10 semaines est estimé à 0.3 par notre modèle, c’est-à-dire qu’entre l’évaluation pré et post-entraînement, les élèves ont progressé de 0.3 écart-type dans la cohorte. L’absence d’interaction avec le logiciel laisse penser que cette amélioration est due à l’évolution normale de l’empan visuo-attentionnel au cours du développement.

Les prédictions du modèle 0 semblent cohérentes par rapport à nos observations, comme



**FIGURE 7.7** – Graphe des performances en lecture de texte (à gauche) et de pseudo-mots (à droite) des élèves ayant joué à *Evasion* (en bleu) et à *Luciole* (en rouge). Les ordonnées correspondent aux scores de performances à ces deux tâches.

le montre leur quasi-alignement sur la Figure 7.5 (pour un modèle parfait les points de ce graphe auraient formé la droite  $y = x$ ). La représentation graphique de notre modèle et les corrections effectuées par classe (voir Figure 7.6) montrent une grande variabilité des classes dans leur sensibilité à l'entraînement. Cela conforte une fois encore notre choix d'avoir pris en compte un effet aléatoire pour la pente et l'ordonnée à l'origine par classe.

## 7.2.2 Analyse de l'évolution des performances en lecture avant et après entraînement

L'absence de différence en terme d'évolution de l'empan visuo-attentionnel entre les élèves ayant joué à *Evasion* et ceux ayant joué à *Luciole* conduit à penser que les performances en lecture post-entraînement devraient être similaires entre les deux groupes, tout au moins pour la part de variance relevant de l'empan visuo-attentionnel. Cependant, il est aussi possible que les propriétés des jeux vidéo d'action d'*Evasion* aient entraîné d'autres mécanismes cognitifs susceptibles d'avoir un effet sur la lecture. Afin d'évaluer cette hypothèse, les performances des deux groupes d'entraînement en post-test ont été comparées pour les épreuves de lecture de pseudo-mots et de texte (voir Figure 7.7).

Les performances des deux groupes ne diffèrent ni en lecture de pseudo-mots ( $t(635.8) = 1.6065, p = 0.11$ ), ni en lecture de texte ( $t(620.9) = 0.90, p = 0.36$ ). Les propriétés des jeux d'action intégrées dans notre jeu n'ont donc pas eu d'effet sur les performances en lecture des élèves ayant utilisé *Evasion*.

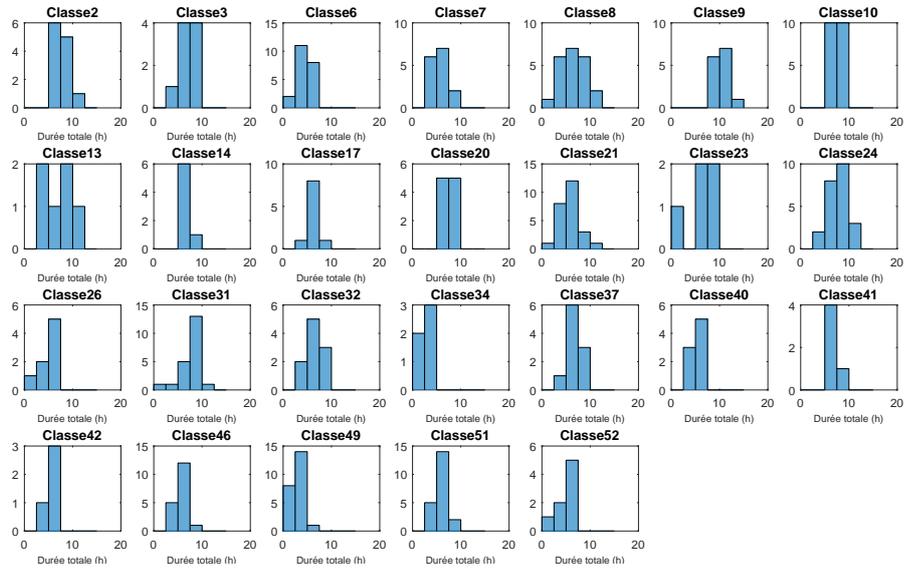


FIGURE 7.8 – Histogramme des temps d'entraînement par classe pour Évasion.

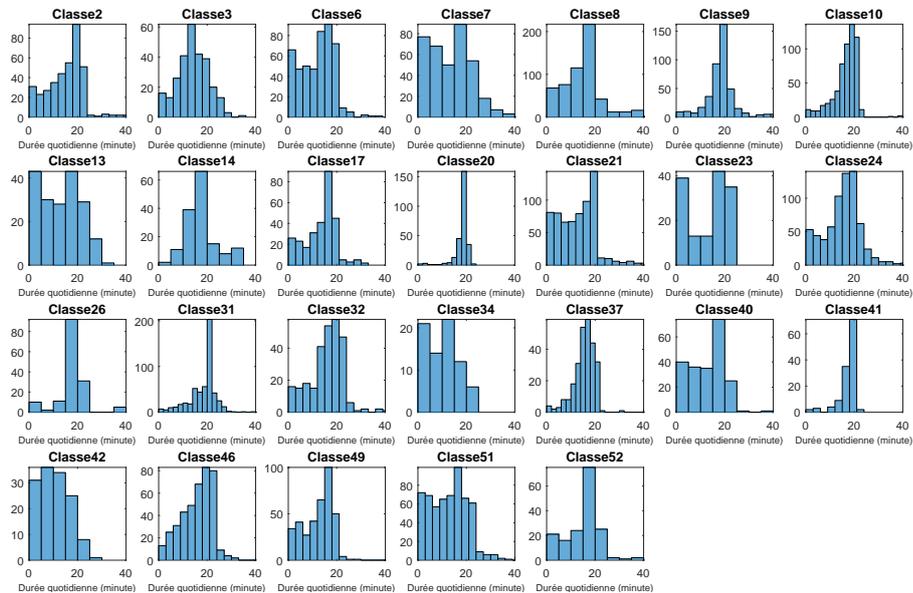
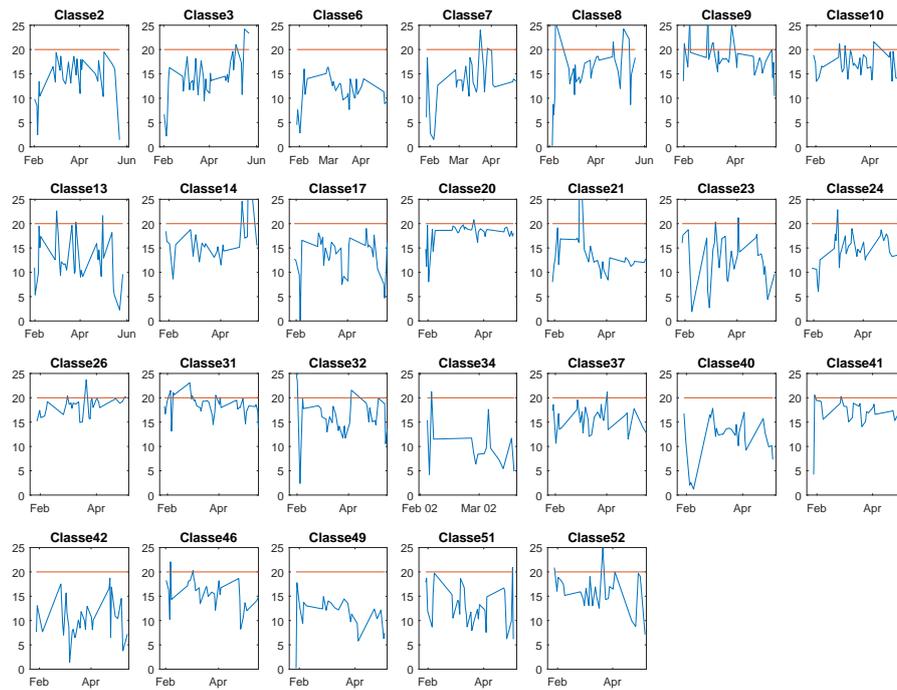


FIGURE 7.9 – Histogramme des durées quotidiennes d'entraînement par classe pour Évasion.



**FIGURE 7.10** – Évolution des durées quotidiennes d’entraînement au cours du protocole. En ordonnée se trouve la durée quotidienne d’entraînement, moyennée sur tous les élèves de la classe. En abscisse se trouve la date à laquelle l’entraînement a eu lieu. La ligne horizontale rouge représente la consigne des 20 mn d’entraînement quotidien.

### 7.2.3 Analyse du suivi du protocole

La variabilité de la sensibilité des classes à l’entraînement pourrait s’expliquer par des variations de la rigueur avec laquelle le protocole a été suivi. Un examen visuel de l’histogramme des durées d’entraînement de chaque élève (voir Figure 7.8), de l’histogramme des temps d’entraînement quotidiens (voir Figure 7.9) et de l’évolution de la durée moyenne d’entraînement quotidien au cours du protocole (voir Figure 7.10) indique que la qualité de suivi du protocole n’est pas la même pour toutes les classes. La Figure 7.8 montre que le temps d’entraînement par classe est rarement concentré autour des 10h d’entraînement qui avaient été demandées. Les classes 10 et 20 sont un bon exemple de ce qui était attendu mais dans plusieurs cas le temps d’entraînement s’avère largement insuffisant. La Figure 7.9 montre que la durée d’une séance quotidienne d’entraînement par classe n’est que rarement proche des 20 mn. Si les classes 9 et 41 ont particulièrement bien respecté la durée quotidienne d’entraînement prescrite, la majorité des classes ont proposé régulièrement des séances bien plus courtes. La Figure 7.10 montre que la durée d’une séance quotidienne d’entraînement par classe est difficilement maintenue à 20 mn par jour. Les classes 9 et 31 ont réussi à maintenir une durée d’entraînement quotidienne relativement stable, mais de grands écarts au cours du temps caractérisent la durée d’entraînement de la plupart des classes. Cette variabilité peut avoir eu un impact sur l’évolution des capacités d’empan visuo-attentionnel, suite à l’entraînement. C’est ce que nous allons étudier plus en détail dans cette section.

Nous avons attribué un score de respect du suivi à chacune des classes et pour chacune des 3 mesures présentées précédemment, en fonction de seuils définis empiriquement (voir Figure 7.11). Concernant la durée d’entraînement totale, elle a été jugée satisfaisante lorsqu’au moins 90% des élèves ont plus de 5h de jeu et 50% ont plus de 7h de jeu. Elle a été jugée peu satisfaisante lorsque moins de 10% des élèves ont plus de 7h de jeu. Concernant

Classe	2	3	6	7	8	9	10	13	14	17	20	21	23
Temps quotidien	bleu foncé		bleu clair		bleu foncé	bleu foncé	bleu foncé		bleu clair	bleu foncé	bleu foncé		bleu clair
Evolution du temps quotidien	bleu clair				bleu foncé	bleu foncé	bleu foncé		bleu clair		bleu foncé	bleu clair	
Durée totale entraînement	bleu foncé	bleu clair			bleu clair	bleu foncé	bleu foncé	bleu foncé			bleu foncé		bleu foncé
Classe	24	26	31	32	34	37	40	41	42	46	49	51	52
Temps quotidien	bleu foncé	bleu foncé	bleu foncé	bleu foncé		bleu foncé		bleu foncé		bleu clair	bleu clair		bleu foncé
Evolution du temps quotidien	bleu clair	bleu foncé	bleu foncé			bleu foncé		bleu foncé		bleu clair			
Durée totale entraînement	bleu foncé		bleu foncé										

**FIGURE 7.11** – Classification des classes en fonction des 3 critères de bon suivi de protocole. Les cases bleu foncé indiquent que le critère a été respecté, les cases bleu clair que le critère a été partiellement respecté, et les cases blanches qu’il n’a pas été respecté.

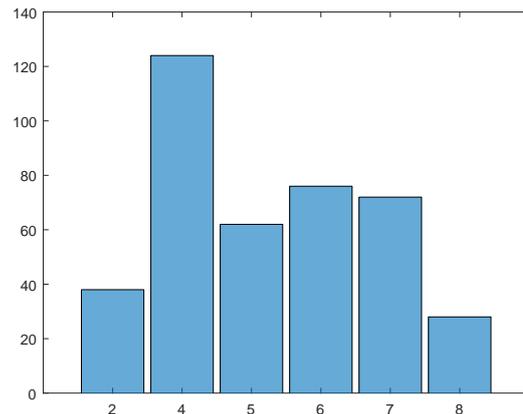
la durée d’entraînement quotidienne, elle a été jugée satisfaisante lorsqu’au moins 60% des séances durent plus de 17 mn, et peu satisfaisante lorsque la moitié des séances durent moins de 10 mn. Pour ce qui est du maintien des séances au cours du temps, il a été jugé satisfaisant lorsque la durée ne varie pas au-delà de 2 mn pendant plusieurs semaines et ne descend jamais en dessous de 15 mn (hors vacances scolaires où l’enseignant réalise parfois des tests), et peu satisfaisant lorsqu’elle connaît des écarts de plus de 5 mn. Sur la base de ces critères, les classes ont été réparties en 3 groupes :

- le groupe « bon suivi » composé des classes 2, 8, 9, 10, 20, 24 et 31 (nombre d’élèves : 129),
- le groupe « suivi insuffisant » composé des classes 6, 7, 21, 34, 42, 49 et 51 (nombre d’élèves : 134),
- le groupe « suivi moyen » composé des classes restantes (nombre d’élèves : 90).

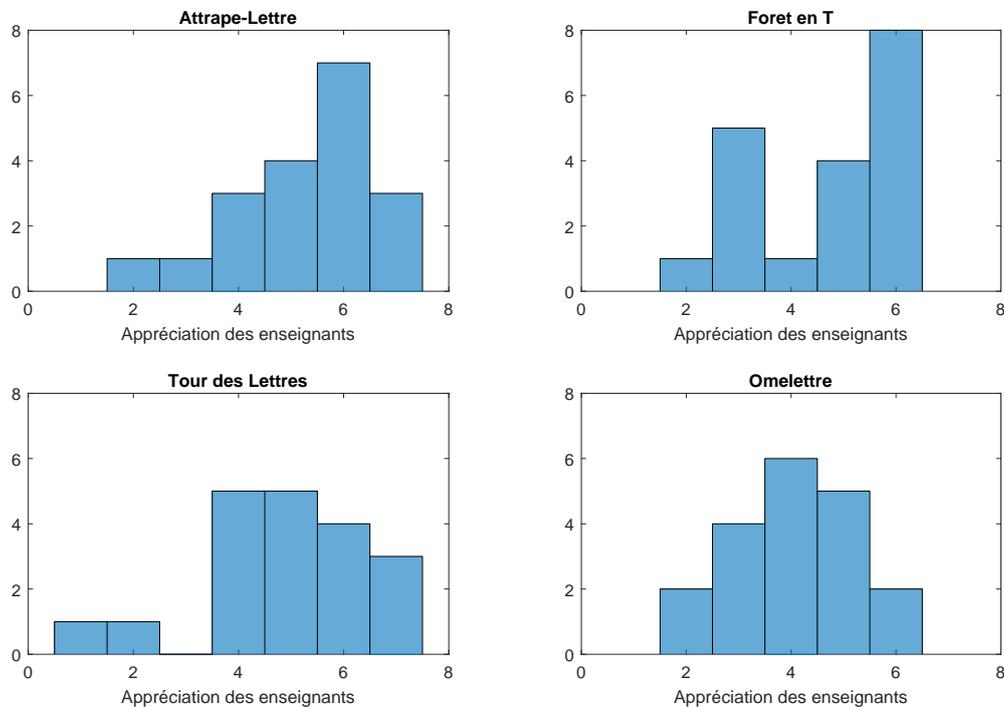
Nous avons conçu le modèle Protocole prenant en compte l’interaction entre l’appartenance à l’un des groupes de respect du protocole et la temporalité du test pour expliquer la mesure de l’empan visuo-attentionnel (voir en Annexe le Tableau E.2). Les trois groupes de classes ne présentent pas de différence en terme d’amélioration de l’empan visuo-attentionnel suite à l’entraînement ( $F(2, 638) = 0.04, p = 0.95$ ). Le fait d’avoir suivi avec rigueur ou non notre protocole n’a donc pas eu d’effet sur l’évolution des capacités visuo-attentionnelles des élèves.

#### 7.2.4 Analyse de la démotivation perçue par les enseignants

Dans le questionnaire distribué aux enseignants, une question portait sur la motivation des élèves. On demandait aux enseignants s’ils avaient perçu un désengagement de leurs élèves durant les 10 semaines d’entraînement et, si oui, à partir de quelle semaine de jeu. Cette information est disponible pour 196 élèves. A la semaine 5 du protocole, la moitié des enseignants ayant répondu au questionnaire font part d’une démotivation de leurs élèves (voir Figure 7.12). Parmi eux, 9 enseignants nous ont fait part d’un problème lié à la durée de vie des jeux : leurs élèves, très enthousiastes au départ, se sont vite lassés. Par exemple, l’enseignant de la classe 6 écrit : « Les jeux ont été très appréciés et même réclamés lors des premières séances mais très rapidement les enfants se sont lassés et il fallait vraiment



**FIGURE 7.12** – Histogramme de la semaine de démotivation perçue par les enseignants. Les ordonnées correspondent au nombre d'observations et non au nombre d'élèves : elles sont à diviser par 2 pour avoir les effectifs réels.

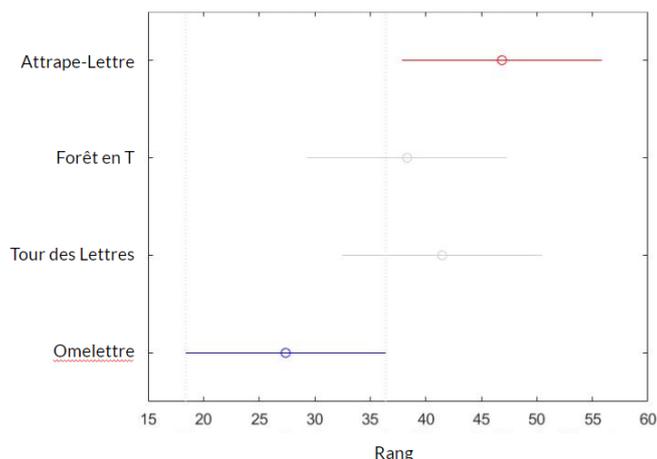


**FIGURE 7.13** – Histogrammes des appréciations des enseignants entre 1 (pas du tout satisfait) et 7 (très satisfait) de l'Attrape-Lettre (en haut, à gauche), de la Forêt en T (en haut, à droite), de la Tour des Lettres (en bas, à gauche) et de l'Omelette (en bas, à droite).

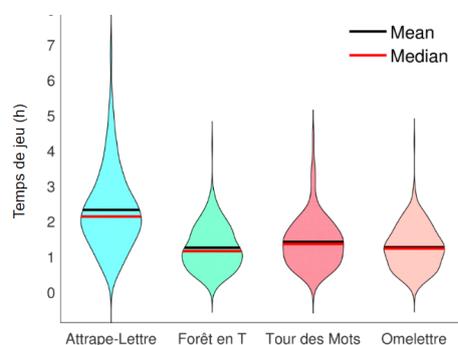
les motiver pour qu'ils jouent durant 20 minutes ». En concevant le modèle Motivation nous avons cherché à savoir si la semaine de démotivation perçue par les enseignants a eu un effet sur l'évolution de la mesure de l'empan visuo-attentionnel suite à l'entraînement (voir en Annexe le Tableau E.3). Il semblerait que ce ne soit pas le cas ( $F(1, 348) = 0.12, p = 0.72$ ).

### 7.2.5 Analyse des préférences des élèves

Dans le questionnaire distribué aux enseignants, une question portait sur les préférences des élèves concernant les 4 mini-jeux d'Evasion. Chaque enseignant devait donner une note



**FIGURE 7.14** – Affichage du test de comparaison multiple des rangs moyens (en abscisse) des appréciations des 4 mini-jeux (en ordonnée).

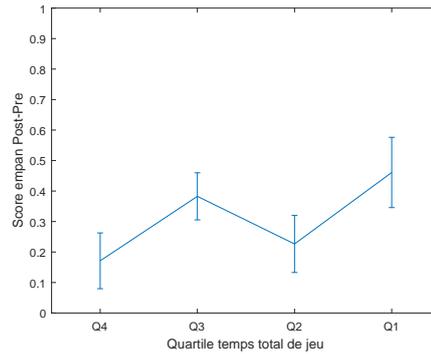


**FIGURE 7.15** – Diagramme en violon des temps de jeu passés sur chaque mini-jeu. En ordonnée se trouve la durée (en heures), en abscisse les différents mini-jeux.

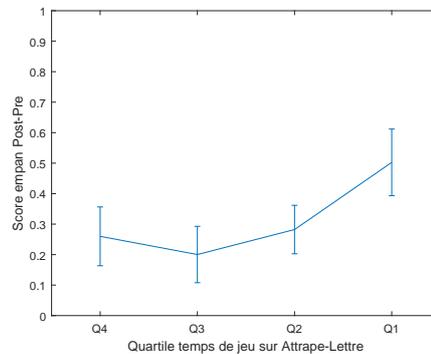
de 1 à 7 pour chacun des mini-jeux (voir Figure 7.13). Cette mesure est bien sûr extrêmement subjective : l’appréciation des préférences des élèves par l’enseignant est nécessairement une approximation moyenne du ressenti des élèves les plus démonstratifs. Cela dit, elle nous donne quand même un premier niveau d’information pour comparer nos différents mini-jeux. Nous avons cherché à voir s’il existait une différence entre nos 4 mini-jeux. Les mini-jeux n’ont pas été appréciés de manière équivalente ( $\chi^2 = 8.23, df = 3, p < 0.05$ ). Un test post-hoc avec correction de Bonferroni suggère que seuls les appréciations de l’Attrape-Lettre et de l’Omelette sont différentes, à la faveur du premier mini-jeu (voir Figure 7.14).

## 7.2.6 Analyse des temps d’entraînement

Du fait de la variabilité du respect du protocole, les temps d’entraînement totaux sont très différents selon les classes. Il en est de même pour la répartition du temps d’entraînement entre les différents mini-jeux (voir Figure 7.15). La Figure 7.15 illustre le temps de jeu effectif sur les quatre mini-jeux d’Évasion. Les résultats montrent que le temps d’entraînement sur l’Attrape-Lettre est supérieur au temps d’entraînement sur les trois autres mini-jeux qui, quant à eux, ont été utilisés sur des durées équivalentes. Il se pourrait que le temps d’entraînement ait une influence sur l’évolution de l’empan visuo-attentionnel suite à l’utilisation d’Évasion. Pour tester cette hypothèse, nous avons conçu le modèle Temps prenant en compte l’interaction entre le temps d’entraînement total et la temporalité du



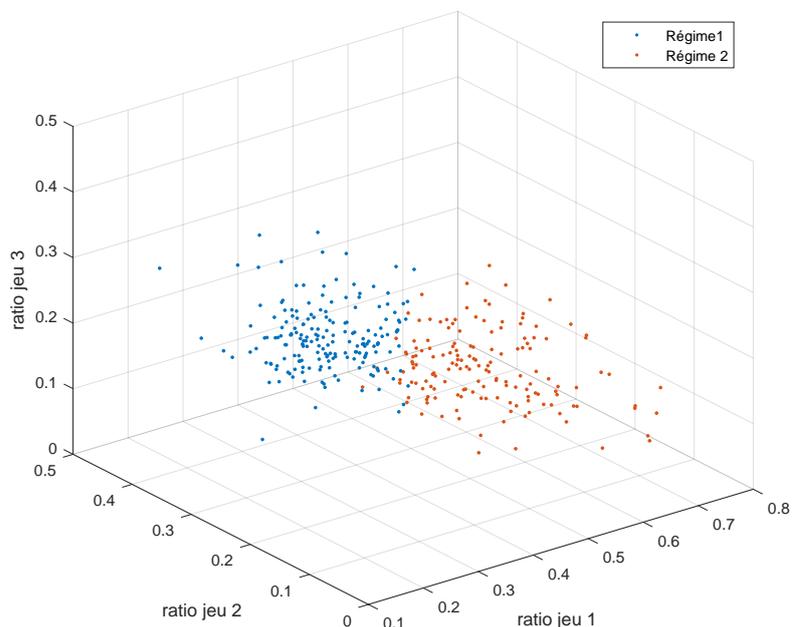
**FIGURE 7.16** – Évolution de la différence de score d'empan visuo-attentionnel en fonction du temps total d'entraînement. En ordonnée, se trouve la différence de score d'empan Post-Pré entraînement. En abscisse, se trouvent les quartiles des durées d'entraînement individuelles ( $Q1 > Q2 > Q3 > Q4$ ).



**FIGURE 7.17** – Évolution de la différence de score d'empan en fonction du temps passé sur l'Attrape-Lettre. En ordonnées, se trouve la différence de score d'empan Post-Pré entraînement. En abscisse, se trouvent les quartiles de temps passé sur l'Attrape-Lettre ( $Q1 > Q2 > Q3 > Q4$ ).

test. Les résultats (voir en Annexe le Tableau E.4) montrent que le temps total de jeu effectif a un effet positif sur l'évolution de l'empan visuo-attentionnel après entraînement ( $\beta = 0.13, CI_{95} = [0.02; 0.24], p < 0.05$ ). Il suggère que plus le temps d'entraînement sur Evasion a été long, plus les enfants ont amélioré leur empan visuo-attentionnel (voir Figure 7.16).

Pour caractériser la contribution des différents mini-jeux à cet effet et éventuellement identifier celui dont l'impact est le plus important, nous avons conçu un nouveau modèle, T1, qui prend en compte l'interaction entre la temporalité du test et les temps passés sur chaque mini-jeu (voir en Annexe le Tableau E.5). Seule l'interaction entre la temporalité du test et le temps de jeu passé sur l'Attrape-Lettre est significative ( $\beta = 0.13, CI_{95} = [0.02; 0.24], p < 0.01$ ), voir Figure 7.17). Il semblerait donc que l'effet du temps total sur l'évolution de l'empan visuo-attentionnel après entraînement soit dû à la contribution de l'Attrape-Lettre essentiellement.



**FIGURE 7.18** – Répartition des élèves dans l’espace tridimensionnel des proportions des temps passés sur chaque mini-jeu. Etant donné que nous manipulons des proportions, la proportion de temps passé sur le quatrième mini-jeu peut se déduire de la proportion de temps passé sur les 3 autres. En rouge sont affichés les élèves qui ont préféré l’Attrape-Lettre et en bleu sont affichés les élèves qui ont joué de manière équivalente aux 4 mini-jeux.

**TABLEAU 7.1** – Coordonnées des centroïdes des groupes associés aux régimes de jeu calculés dans l’espace 4D des temps de jeu relatifs. Ces coordonnées correspondent au temps moyen ( $M$ ) de jeu du groupe pour chaque mini-jeu. La dispersion des données autour des centroïdes est donnée par l’écart-type ( $Sd$ ).

Régime	Attrape- lettre	Forêt en T	Tour des lettres	Omelette	Nombre d’élèves
Préférence A-L	$M=0.476$ ; $Sd=0.07$	$M=0.153$ ; $Sd=0.05$	$M=0.194$ ; $Sd=0.06$	$M=0.175$ ; $Sd=0.06$	155
Equilibré	$M=0.284$ ; $Sd=0.05$	$M=0.241$ ; $Sd=0.04$	$M=0.249$ ; $Sd=0.06$	$M=0.224$ ; $Sd=0.5$	187

### 7.2.7 Analyse des régimes d'entraînement

Étant donné que nous n'avons pas contraint les durées passées sur chaque mini-jeu, il est possible que les élèves adoptent spontanément des comportements de jeu particuliers. Nous étudions donc ici les proportions de temps passé sur chaque jeu ; un régime d'entraînement parfaitement « équilibré » se traduirait par exactement 25% de temps passé sur chaque mini-jeu. Pour caractériser ces comportements et voir leur répartition dans notre population, nous avons utilisé un algorithme de partitionnement par k-moyenne sur ces proportions de temps. L'objectif d'un algorithme de partitionnement est d'attribuer chaque point de l'espace à un groupe, dont les caractéristiques ne sont pas connues a priori. Dans les méthodes de k-moyenne, seul le nombre de groupes recherchés doit être spécifié à l'avance<sup>4</sup>. Nous avons testé un partitionnement à 2, 3 et 4 groupes sur nos données, et suite à des applications répétées de l'algorithme, seul le partitionnement en 2 groupes reste stable (10 tests sur nos données, voir le résultat du partitionnement à la Figure 7.18). Ceci suggère que deux groupes suffisent à décrire raisonnablement le comportement des utilisateurs. Les coordonnées des centroïdes (voir en Annexe le Tableau 7.1) indiquent l'existence de deux régimes d'entraînement : un premier groupe de 187 élèves montre une pratique équilibrée entre les 4 mini-jeux et le second groupe de 155 élèves montre une pratique biaisée en faveur de l'Attrape-Lettre (à l'égal détriment des 3 autres jeux).

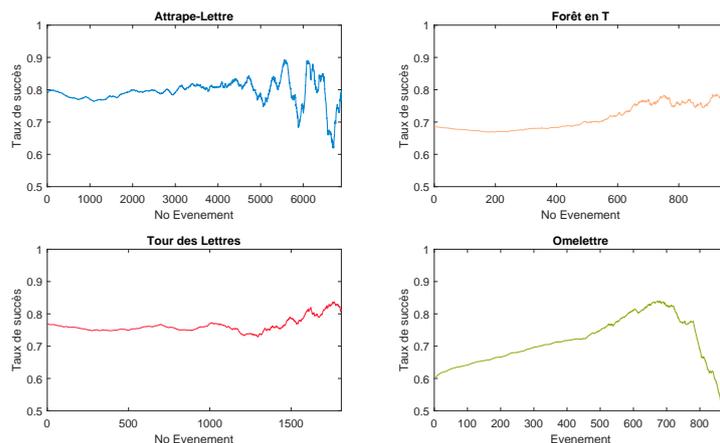
Nous avons cherché à expliquer l'évolution du score d'empan visuo-attentionnel en fonction de la temporalité du test (pré/post) et de l'interaction entre la temporalité du test et le suivi de l'un des deux régimes d'entraînement (voir en Annexe le Tableau E.6). Ce modèle, nommé modèle Regime, suggère une tendance du régime d'entraînement à améliorer l'effet de l'entraînement sur l'empan visuo-attentionnel ( $\beta = 0.18$ ,  $CI_{95} = [-0.0; 0.39]$ ,  $p = 0.06$ ).

Nous avons donc rajouté le temps de jeu total comme effet fixe dans un nouveau modèle Regime+ pour contrôler son impact sur l'interaction entre le régime d'entraînement et la temporalité du test (voir en Annexe le Tableau E.7). L'interaction entre le régime d'entraînement et la temporalité du test est à présent absorbée par celle entre le temps de jeu total et la temporalité du test. Il semble que l'effet du régime d'entraînement estimé par le modèle Regime rendait en réalité compte de l'effet du temps d'entraînement que l'on avait déjà caractérisé à la Section 7.2.6.

### 7.2.8 Analyse du taux de réussite

L'algorithme Parseval a été conçu de manière à proposer aux élèves des exercices qu'ils ont 75% de chance de réussir. Le taux de réussite de chaque élève peut à la fois nous informer sur son adéquation avec l'espace de difficulté (si son taux de réussite est à 90%, l'espace de difficulté ne contient que des exercices trop faciles pour lui) et sur son état interne (s'il a jusqu'à présent 75% de réussite mais que brutalement ses performances tombent à 30%, il a peut-être arrêté d'interagir avec le jeu ou éprouve de la fatigue). Dans cette section, nous nous intéresserons donc à l'évolution du taux de réussite pour chaque mini-jeu, puis au sein de chaque portion de l'espace de difficulté. Ces informations nous permettront de savoir si Parseval a fonctionné correctement et si notre espace de difficulté est correctement dimensionné. Nous verrons ensuite si le taux de réussite explique une partie de l'évolution de l'empan visuo-attentionnel suite à l'entraînement sur Evasion.

4. Le lecteur qui n'est pas familier de ces méthodes pourra trouver une illustration claire de leur fonctionnement ici : <https://towardsdatascience.com/the-5-clustering-algorithms-data-scientists-need-to-know-a36d136ef68>.



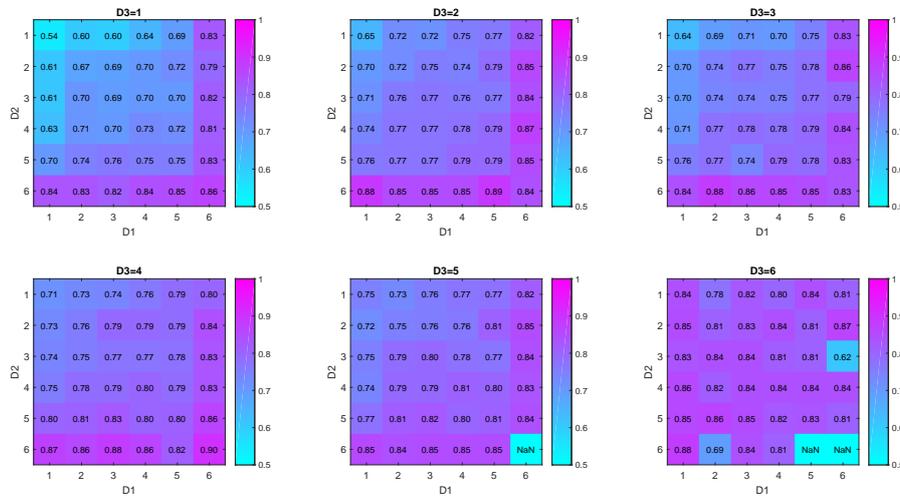
**FIGURE 7.19** – Évolution du taux de réussite moyen (en ordonnée) au cours du temps (en abscisse) pour l’Attrape-Lettre (en haut, à gauche), pour la Forêt en T (en haut, à droite), pour la Tour des Lettres (en bas, à gauche) et pour l’Omelette (en bas, à droite). Les variations sur les parties droites des graphes sont causées par une diminution du nombre de participants au fur et à mesure des essais, et nous ne les interprétons pas.

### 7.2.8.1 Evolution du taux de réussite au cours du temps et au sein des espaces de difficulté de chaque mini-jeu

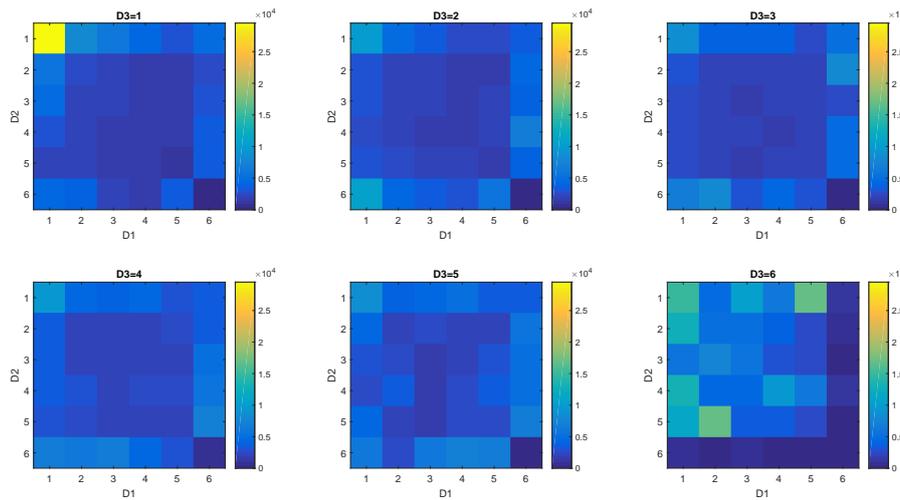
Si Parseval fonctionne correctement, le taux de réussite moyen par élève et par mini-jeu devrait être proche de 75%. C’est le cas pour l’Attrape-Lettre ( $M = 0.76$ ,  $Sd = 0.1012$ ) et pour la Tour des Lettres ( $M = 0.75$ ,  $Sd = 0.09$ ) mais ni pour la Forêt en T ( $M = 0.67$ ,  $Sd = 0.11$ ) ni pour l’Omelette ( $M = 0.60$ ,  $Sd = 0.19$ ). Pour chaque mini-jeu, le taux de réussite moyen a été calculé par une moyenne glissante de taille 100 sur les observations booléennes codant la réussite ou l’échec d’un événement donné. Ce taux de réussite moyen apparaît relativement stable au cours du temps (voir Figure 7.19), pour l’Attrape-Lettre et la Tour des Lettres. Pour la Forêt en T et l’Omelette, nous observons une tendance à l’augmentation du taux de réussite moyen avec le temps, que nous n’analysons pas en détail.

Les taux de réussite moyens ont également été calculés pour chaque région de l’espace de difficulté pour nos 4 mini-jeux (voir Figure 7.20 pour l’Attrape-Lettre, les graphes des autres mini-jeux sont présentés en Annexe F). Normalement, le taux de réussite devrait être constant au sein de l’espace de difficulté, étant donné qu’une configuration n’est proposée que quand le modèle estime que l’élève a des chances raisonnables de la réussir. Or, pour chacun des mini-jeux, des irrégularités apparaissent. Comme le montre la Figure 7.20, la configuration la moins bien réussie sur l’Attrape-lettres est la configuration la plus facile. Ceci est également observé sur les autres mini-jeux, ce qui suggère que l’élève arrête régulièrement d’interagir avec la tablette et donc enchaîne les échecs. Parseval, propose alors des configurations plus faciles qui continuent à être manquées. La Figure 7.21 pour l’Attrape-Lettre (les graphes des autres mini-jeux étant en Annexe F) semble aller dans ce sens : la configuration la plus facile est proposée très souvent.

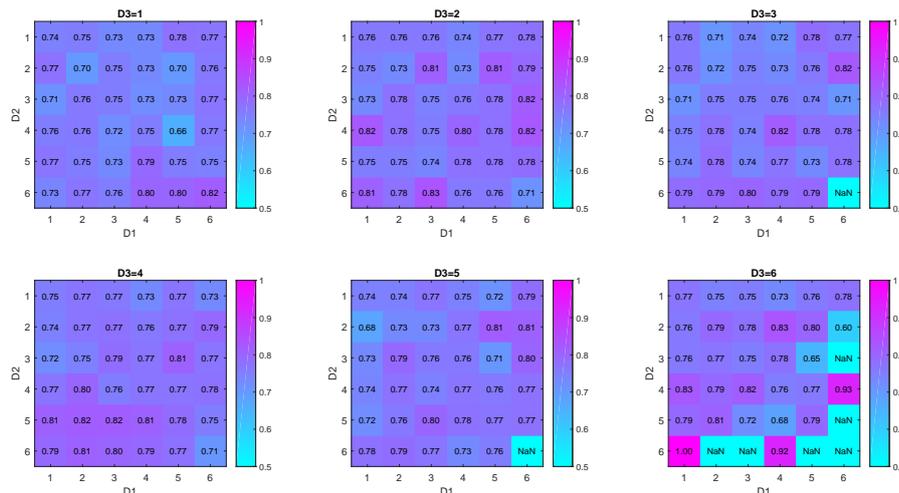
Pour l’Attrape-lettres, le taux de réussite semble même augmenter avec la difficulté. Deux raisons peuvent être à l’origine de ce résultats : il est possible que l’espace de difficulté des mini-jeux ne soient pas adapté au niveau des élèves ou que Parseval ne fonctionne pas. Concernant le premier point, les différents exercices ne sont pas proposés au même moment de l’entraînement, les exercices les plus difficiles étant proposés lorsque l’élève commence



**FIGURE 7.20** – Taux de réussite moyen calculé pour chaque case de l'espace de difficulté associé à l'Attrape-Lettre. En abscisse, la longueur des séquences, en ordonnée, la similarité visuelle cible/distracteur, et les sous-graphes 1 à 6 correspondent aux 6 valeurs de vitesse et densité des items du jeu. Les NaN indiquent que cette configuration n'a jamais été proposée aux élèves de notre cohorte.



**FIGURE 7.21** – Nombre de configuration proposées pour chaque région de l'espace de difficulté associé à l'Attrape-Lettre. Les axes sont les mêmes que ceux de la Figure 7.20.



**FIGURE 7.22** – Taux de réussite moyen calculé pour chaque case de l’espace de difficulté associé à l’Attrape-Lettre pour les élèves dont le taux de réussite est compris entre 0.7 et 0.8. Les axes de cette figure sont les mêmes que ceux de la figure 7.20.

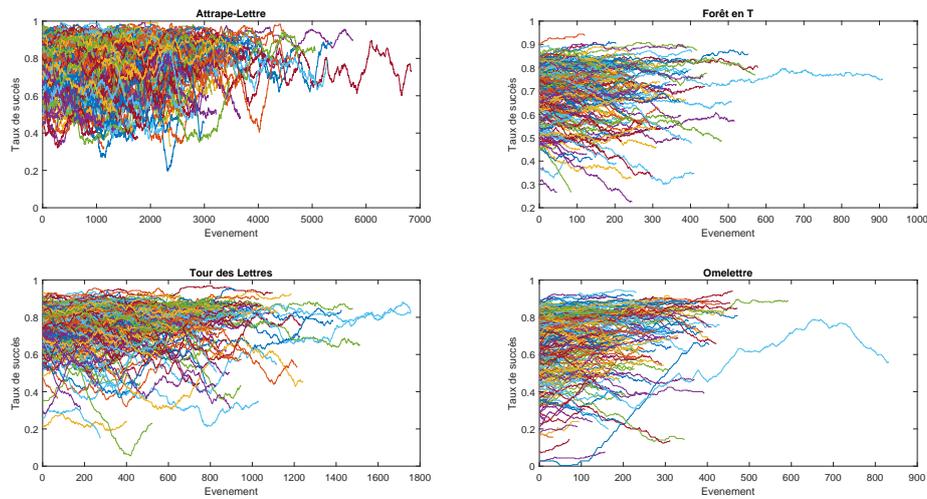
à atteindre un niveau satisfaisant. De plus, il existe des élèves « plafonneurs », que nous décrirons à la Section 7.2.8.2, et dont le taux de réussite est supérieur à 80% même pour les configurations les plus difficiles. Ces élèves, qui sont également ceux pour lesquels ces configurations sont le plus souvent proposées, tirent donc les taux de réussite des configurations difficiles vers le haut. Cela suggère que les mini-jeux de l’Attrape-Lettre et l’Omelette sont trop faciles pour une partie des élèves.

Pour vérifier si Parseval ne fonctionne pas et ne parvient pas à proposer des exercices adaptés aux élèves, nous avons réitéré cette analyse en ne prenant en compte que les élèves dont le taux de réussite est compris entre 70% et 80%, valeurs proches de la consigne de Parseval (voir Figure 7.22 pour l’Attrape-Lettre, les graphes des autres mini-jeux étant en Annexe F). Pour l’Attrape-Lettre et la Tour des Lettres, les irrégularités ont disparu et le taux de réussite moyen est constant quelle que soit la case de l’espace de difficulté. Il semblerait que Parseval fonctionne donc correctement, mais que les configurations contenues dans l’espace de difficulté sont trop faciles.

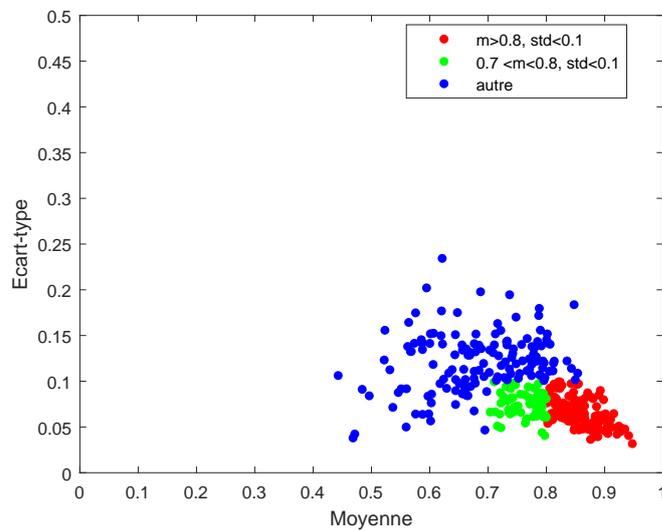
### 7.2.8.2 Effet du taux de réussite sur l’évolution de l’empan visuo-attentionnel après entraînement

Le taux de réussite d’un élève pour un mini-jeu révèle sa compatibilité avec l’espace de difficulté. Cette compatibilité peut avoir un effet sur l’amélioration des performances visuo-attentionnelles induite par l’entraînement : c’est tout l’enjeu des algorithmes d’adaptation de la difficulté. Nous avons fixé a priori la valeur du taux de réussite à 0.75. Or, les taux de réussite sont très variables d’un élève à l’autre (voir Figure 7.23). Pour chaque mini-jeu, nous avons donc séparé les élèves en trois groupes en fonction de leur taux de réussite :

- le groupe des « plafonneurs », dont le taux de réussite est supérieur à 80% ( $M > 0.80, Sd < 0.1, N = 135$ , en rouge sur la Figure 7.24) pour lesquels l’espace de difficulté ne contient probablement pas de configurations suffisamment difficiles,
- le groupe « parseval 75 », dont le taux de réussite est entre 70% et 80% ( $0.70 < M < 0.80, Sd < 0.1, N = 57$ , en vert sur la Figure 7.24) pour lesquels les configurations



**FIGURE 7.23** – Évolution du taux de réussite individuel (en ordonnée) au fur et à mesure des événements (en abscisse) pour l'Attrape-Lettre (en haut, à gauche), pour la Forêt en T (en haut, à droite), pour la Tour des Lettres (en bas, à gauche) et pour l'Omelette (en bas, à droite).



**FIGURE 7.24** – Regroupement des élèves en fonction de la moyenne (en abscisse) et de l'écart type (en ordonnée) de leur taux de réussite illustré ici sur l'Attrape-Lettre. Le groupe rouge est celui des « plafonneurs », le groupe vert est celui dont le comportement est standard par rapport au fonctionnement de Parseval et le groupe bleu est composé du reste de notre population.

proposées devraient être suffisamment difficiles pour les entraîner mais suffisamment faciles pour ne pas les démotiver,

- le reste des sujets dont le taux de réussite est inférieur à 70% et/ou l’écart type est supérieur à 10% ( $N = 149$ , en bleu sur la Figure 7.24), indiquant que le sujet est vraisemblablement peu engagé dans son entraînement.

Le nombre d’élèves par groupe est le même quelque soit le mini-jeu concerné, bien qu’un même élève puisse appartenir à des groupes différents en fonction du mini-jeu considéré. Comparer ces 3 groupes nous permet de voir quel taux de réussite en particulier a un effet sur les bénéfices que retirent les élèves de l’entraînement. Nous avons conçu un modèle qui prend en paramètre la temporalité du test et l’interaction entre cette dernière et l’appartenance à l’un de ces groupes pour chaque mini-jeu. Quel que soit le mini-jeu considéré, aucune différence ne sépare ces 3 groupes pour chaque mini-jeu ( $TauxR_{Attrape-lettre} : F(2, 608) = 0.94, p = 0.38$ ;  $TauxR_{Foret\ En\ T} : F(2, 608) = 0.71, p = 0.49$ ;  $TauxR_{Tour\ des\ Lettres} : F(2, 608) = 0.09, p = 0.90$ ;  $TauxR_{Omelette} : F(2, 608) = 0.71, p = 0.49$ ). Nous n’avons donc en l’état pas d’information sur la pertinence de notre consigne à 0.75 de taux de réussite.

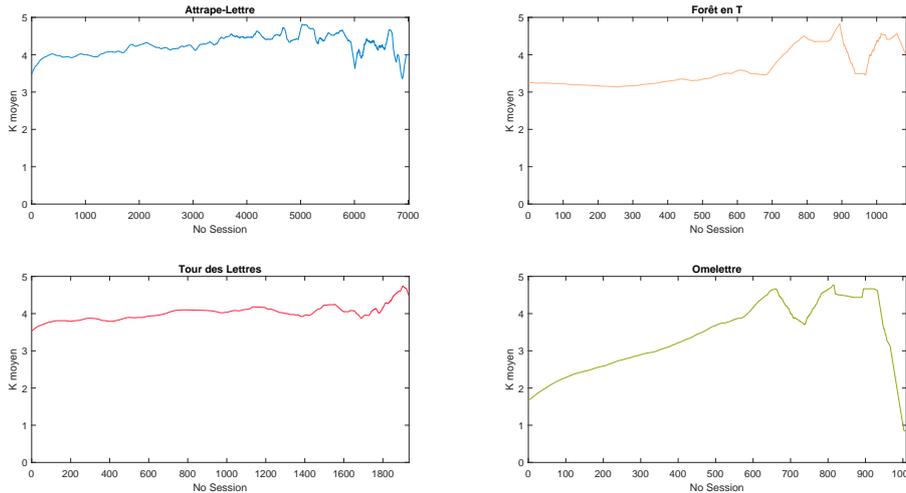
## 7.2.9 Analyse du niveau estimé des élèves

Le progrès au sein des différents mini-jeux est un marqueur de l’effet de l’entraînement. Si les élèves ont progressé à ce jeu, il est probable que les mécanismes cognitifs sous-jacents aient été entraînés et qu’il y ait un transfert d’apprentissage vers les tâches de mesure de l’empan visuo-attentionnel. Rappelons que, dans l’algorithme Parseval, le niveau de performance d’un élève est modélisé par la position du point  $K$  d’inflexion de la courbe psychométrique. Dans cette section, nous nous intéresserons d’abord à l’effet de l’entraînement sur l’évolution du niveau  $K$  estimé, puis nous essaierons de caractériser l’impact du taux de réussite sur l’évolution de  $K$  et enfin, nous verrons si l’évolution de  $K$  a un effet sur l’évolution de l’empan visuo-attentionnel suite à l’entraînement.

### 7.2.9.1 Progrès des élèves au sein des mini-jeux

Pour évaluer l’évolution du niveau  $K$  estimé des élèves au cours des différents mini-jeux, nous avons considéré les essais 50 à 150 comme représentatifs des débuts de l’entraînement et les 100 essais après 1h30 d’entraînement sur ce mini-jeu comme représentatif de la fin de l’entraînement. Pour la Forêt en T et l’Omelette, nous considérons les 100 essais après 1h d’entraînement, au lieu d’1h30, car peu d’élèves ont joué suffisamment longtemps à ces mini-jeux. Nous avons conçu 4 modèles (J1 pour l’Attrape-Lettre, J2 pour la Forêt en T, J3 pour la Tour des Lettres et J4 pour l’Omelette) pour évaluer l’effet de la temporalité de l’entraînement sur le niveau  $K$  estimé. Comme variable aléatoire, nous avons autorisé la pente et l’intercept à varier par participant. Les résultats sont présentés en Annexe (Tableau E.8).

Il y a bien une amélioration suite à l’entraînement pour l’Attrape-Lettre ( $\beta = 0.36, CI_{95} = [0.24; 0.47], F(1, 65446) = 38.26, p < 0.001$ ), pour la Tour des lettres ( $\beta = 0.22, CI_{95} = [0.14; 0.29], F(1, 61406) = 32.14, p < 0.001$ ), pour l’Omelette ( $\beta = 1.36, CI_{95} = [0.98; 1.74], F(1, 8886) = 48.98, p < 0.001$ ) mais pas pour la forêt en T ( $F(1, 24844) = 0.86, p = 0.35$ ). Mais il convient de remarquer que pour les trois premiers mini-jeux, l’amélioration constatée est relativement faible. Hormis pour l’Omelette, cette amélioration est de l’ordre du cinquième ou du tiers du cran de difficulté. De plus, les élèves atteignent rapidement les régions les plus difficiles de l’espace de difficulté, comme le montre l’évolution du taux de



**FIGURE 7.25** – Évolution du niveau estimé  $K$  moyen (en ordonnée) en fonction du temps (en abscisse) pour l'Attrape-Lettre (en haut, à gauche), pour la Forêt en T (en haut, à droite), pour la Tour des Lettres (en bas, à gauche) et pour l'Omelette (en bas, à droite).  $K$  étant un point dans l'espace des configurations, il est tri-dimensionnel ( $K = \langle x_k, y_k, z_k \rangle$ ) : l'ordonnée ici est la moyenne des coordonnées  $(x_k + y_k + z_k)/3$ , et varie donc entre 0 (lorsque  $K = \langle 0, 0, 0 \rangle$ ) et 5 (lorsque  $K = \langle 5, 5, 5 \rangle$ ).

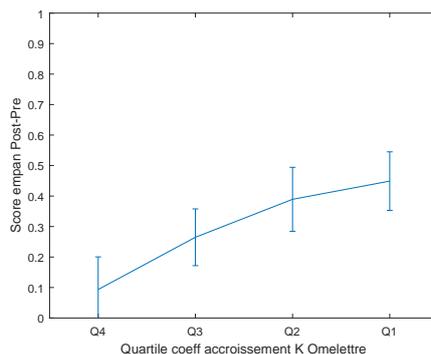
réussite moyen par mini-jeu ( $M_{AL} = 4.05, Sd_{AL} = 1.53; M_{FT} = 3.22, Sd_{FT} = 1.80; M_{TdL} = 3.86, Sd_{TdL} = 1.49; M_{Om} = 2.47, Sd_{Om} = 2.14$ , voir Figure 7.25).

### 7.2.9.2 Effet du taux de réussite sur l'évolution du niveau $K$ estimé

Alors qu'il devrait être constant, nous avons vu à la section 7.2.8.1 que le taux de réussite est très variable selon les sujets. Si cette grandeur n'expliquait pas l'amplitude de l'évolution de l'empan visuo-attentionnel, elle pourrait éventuellement expliquer l'évolution du niveau  $K$  estimé au cours du temps. En effet, un taux de réussite trop haut suggère que le niveau du joueur est dans les portions de l'espace de difficulté les plus difficiles et que donc il ne progressera plus. De même un taux de réussite trop bas laisse penser que le joueur n'est pas engagé dans son entraînement et qu'il progressera peu.

Nous avons conservé les groupes constitués à la Section 7.2.8.2 en fonction de leur taux de réussite et nous sommes intéressés à leur interaction avec l'évolution de  $K$  au cours de l'entraînement. Pour cela, nous avons intégré cette interaction comme effet fixe dans 4 modèles mixtes définis pour chaque mini-jeu (K1 pour l'Attrape-Lettre, K2 pour la Forêt en T, K3 pour la Tour des Lettres et K4 pour l'Omelette), en introduisant le sujet comme effet aléatoire pour la pente et l'ordonnée à l'origine. Le groupe dont le taux de réussite est inférieur à 70% sera considéré comme le groupe de référence. Les résultats sont présentés en Annexe dans le Tableau E.9 (*parsevalGroupe2* correspond à ceux dont le taux de réussite est entre 0.7 et 0.8, *parsevalGroupe1* correspond à ceux dont le taux de réussite est supérieur à 0.8).

Cette interaction ne semble avoir d'effet sur la pente du niveau  $K$  estimé ni pour l'Attrape-Lettre ( $F(2, 625) = 116, p = 0.31$ ), ni pour l'Omelette ( $F(2, 524) = 0.22, p = 0.79$ ). En revanche, elle semble avoir un effet sur la pente du niveau  $K$  estimé pour la Forêt en T ( $F(2, 535) = 2.99, p < 0.05$ ) et pour la Tour des Lettres ( $F(2, 615) = 19.46, p < 0.001$ ).



**FIGURE 7.26** – Évolution de la différence de score d'empan en fonction de l'évolution du niveau estimé  $K$  dans l'Omelette. En ordonnées, se trouve la différence de score d'empan Post-Pré entraînement. En abscisse, se trouvent les quartiles des coefficients de l'accroissement du niveau estimé  $K$  dans l'Omelette ( $Q1 > Q2 > Q3 > Q4$ ).

Pour ces deux derniers jeux, il semblerait qu'appartenir au groupe « plafond » ait un effet négatif (Forêt en T :  $\beta = -0.25$ ,  $CI_{95} = [-0.49; -0.01]$ ,  $p < 0.05$ ; Tour des Lettres :  $\beta = -0.55$ ,  $CI_{95} = [-0.73; -0.37]$ ,  $p < 0.001$ ) par rapport au groupe de référence. Pour la Tour des Lettres uniquement, il semblerait qu'appartenir au groupe « parseval 75 » ait aussi un effet négatif sur l'évolution de  $K$  au cours du temps par rapport au groupe de référence, alors que seule une tendance de cet effet est suggérée dans la Forêt en T (Forêt en T :  $\beta = -0.17$ ,  $CI_{95} = [-0.36; 0.012]$ ,  $p = 0.057$ ). Contrairement à nos attentes, le fait d'avoir un taux de réussite moyen compris entre 70% et 80% n'améliore pas l'évolution de  $K$  au cours du temps. Le groupe le plus favorable semble être celui dont le taux de réussite est inférieur à 70%.

### 7.2.9.3 Effet du progrès au sein des mini-jeux sur l'évolution de l'empan visuo-attentionnel après entraînement

Tout d'abord, nous avons construit une variable pour représenter le progrès d'un élève au sein d'un mini-jeu. Pour cela, nous avons effectué une régression linéaire sur le niveau  $K$  estimé entre les essais 20 et 100 et les 80 derniers essais, en excluant les participants ayant moins de 180 essais. Nous avons conservé le coefficient d'accroissement de cette régression pour chaque sujet et chaque mini-jeu. Dans l'analyse précédente, nous avons sélectionné les 100 essais au bout d'une durée fixe pour étudier l'ampleur de l'amélioration aux mini-jeux, indépendamment du temps passé dessus. Ici, en revanche, nous voulons vérifier si l'ampleur de l'amélioration du progrès au sein des mini-jeux expliquait l'évolution de l'empan visuo-attentionnel indépendamment du temps passé dessus : c'est pour cela que nous avons sélectionné les 80 derniers essais d'un joueur et pas les  $N$  essais au bout d'une durée donnée.

Nous avons modélisé l'interaction des coefficients d'accroissement de chaque mini-jeu avec l'évolution de l'empan visuo-attentionnel après entraînement (voir en Annexe le Tableau E.10). Seuls la temporalité du test ( $\beta = 0.31$ ,  $CI_{95} = [0.16; 0.46]$ ,  $p < 0.01$ ) et le coefficient d'accroissement de l'Omelette ( $\beta = 0.11$ ,  $CI_{95} = [0.01; 0.21]$ ,  $p < 0.05$ ) ont un effet sur le score d'empan visuo-attentionnel (voir Figure 7.26).

## 7.2.10 Résumé et analyses approfondies des principaux résultats

Pour expliquer la variabilité du score d'empan visuo-attentionnel, nous avons conçu les modèles suivants :

- le modèle 0 qui intègre l'effet de la temporalité du test et son interaction avec le jeu utilisé à l'entraînement (Luciole ou Evasion),
- le modèle Protocole qui intègre l'effet de la temporalité du test et son interaction avec la qualité du suivi du protocole,
- le modèle Motivation qui intègre l'effet de la temporalité du test et son interaction avec la semaine de démotivation,
- le modèle Temps qui intègre l'effet de la temporalité du test et son interaction avec le temps total d'entraînement,
- le modèle Temps1 qui intègre l'effet de la temporalité du test et son interaction avec le temps passé sur chaque mini-jeu,
- le modèle Regime qui intègre l'effet de la temporalité du test et son interaction avec le régime d'entraînement,
- le modèle K qui intègre l'effet de la temporalité du test et son interaction avec l'accroissement du niveau  $K$  estimé au sein de chaque mini-jeu.

Tous ces modèles sauf les modèles Motivation et Regime suggèrent un effet de la temporalité du test sur le score d'empan visuo-attentionnel. Parmi les interactions estimées par ces modèles, seules celles entre la temporalité du test et le temps passé sur le mini-jeu de l'Attrape-Lettre, ainsi que celle entre la temporalité du test et le coefficient d'accroissement du niveau estimé  $K$  au sein de l'Omelette, sont significatives.

### 7.2.10.1 Analyse d'autocorrélation

Pour chacun de ces modèles, nous avons examiné la distribution des résidus et leur autocorrélation (voir Figure 7.27 pour le modèle Temps et Figure 7.28 pour le modèle K). La distribution des résidus suggère une fois encore que la relation entre le score de l'empan et les variables de ces modèles est linéaire. En revanche, l'un comme l'autre semblent avoir des résidus autocorrélés, ce qui est confirmé par un test de Durbin-Watson ( $p < 0.001$ ). La présence d'autocorrélation ou, en d'autres termes, de dépendance des résidus du modèle suggère qu'une partie de la variance de score n'est pas expliquée et que donc l'estimation des coefficients du modèle est biaisée. Ces deux points impliquent notamment une augmentation du risque de faux positif.

Si nos modèles avaient pour objectif de confirmer des hypothèses définies a priori, il conviendrait de les ajuster à nouveau en spécifiant la structure de corrélation des résidus dans les estimations. Celle-ci est de type ARMA(1,1) pour nos deux modèles et une fois prise en compte, elle permettrait une estimation plus juste des coefficients du modèle. Cependant, étant dans un cadre exploratoire, nous ne nous autorisons pas à conclure sur les modèles précédents mêmes s'ils suggèrent une interaction de l'évolution de l'empan visuo-attentionnel avec le temps passé sur l'Attrape-Lettre et le coefficient d'accroissement au sein de l'Omelette.

### 7.2.10.2 Sélection de variables automatique

Jusqu'à présent, nous avons sélectionné au préalable les variables qui pouvaient expliquer le score d'empan visuo-attentionnel en fonction de leur pertinence. Ici, nous allons utiliser une procédure de sélection automatique de variables pour voir si des variables que nous

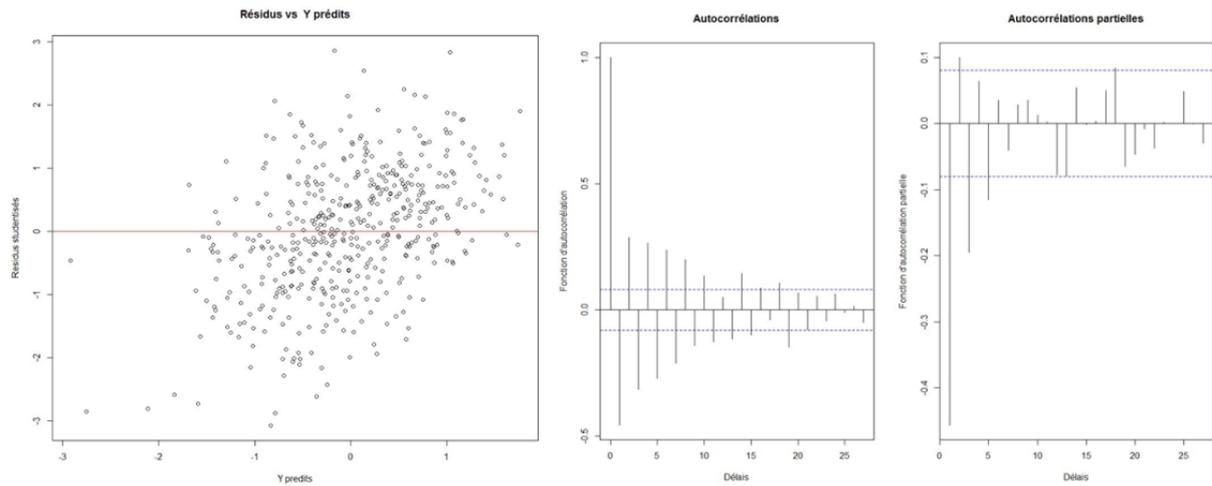


FIGURE 7.27 – Graphe des résidus studentisés (à gauche), graphe d’autocorrélation (au centre) et d’autocorrélation partielle (à droite) pour le modèle T.

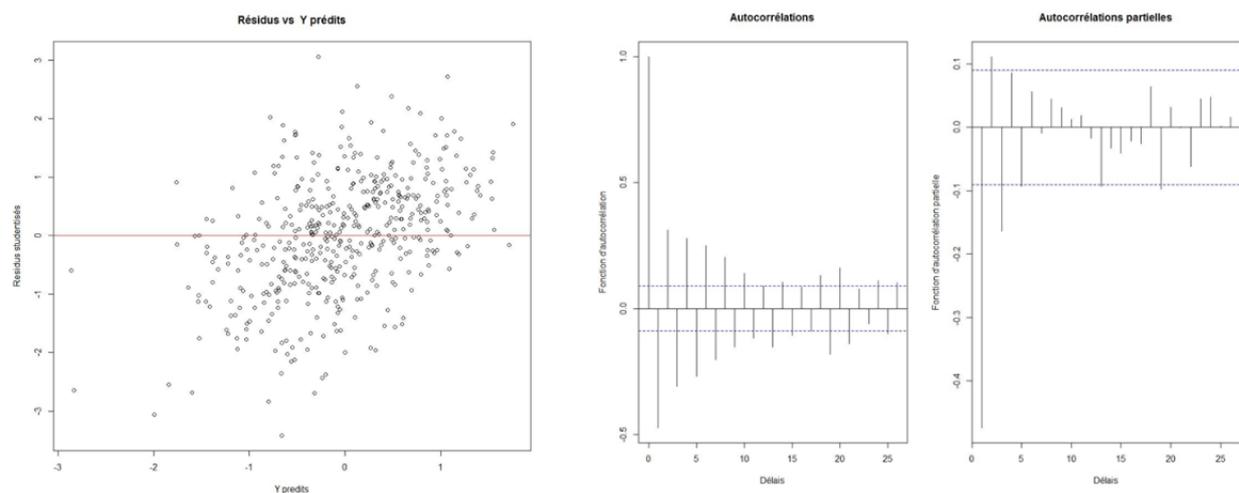
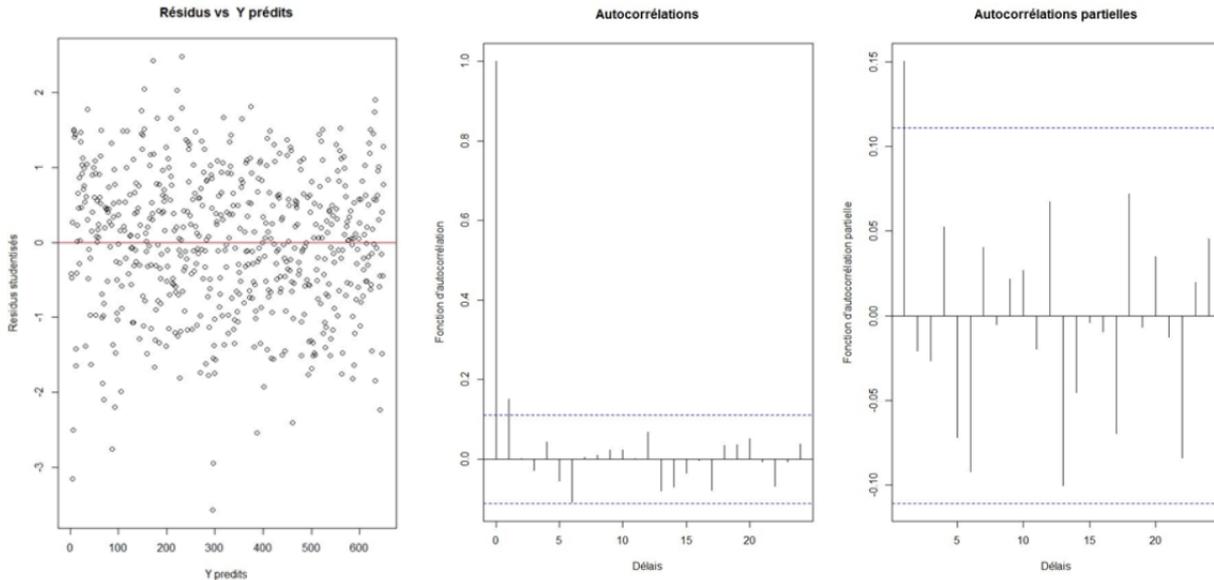


FIGURE 7.28 – Graphe des résidus studentisés (à gauche), graphe d’autocorrélation (au centre) et d’autocorrélation partielle (à droite) pour le modèle K.

n’avions pas spécifiées dans les modèles précédents pourraient avoir un effet sur le score d’empan visuo-attentionnel. Cette procédure permet aussi d’obtenir des modèles robustes en présence de multi-colinéarité dans nos variables explicatives : les variables utilisées par nos différents modèles peuvent en effet être corrélées, et l’effet de l’une peut donc être absorbée par l’autre.

Pour ce faire, nous avons effectué une procédure de sélection de variable « pas-à-pas » en utilisant la fonction `step` du package R (R-3.6.1) `lmerTest` (v. 3.0-1). Nous avons tout d’abord retenu toutes les variables d’interaction étudiées dans la section 7.2 dont la p-valeur était inférieure à 0.3 sur des modèles univariés (c’est-à-dire, où seule cette variable était utilisée pour expliquer le score d’empan visuo-attentionnel) ainsi que tous les effets aléatoires possibles. Nous avons ensuite employé une procédure de sélection descendante : en partant du modèle comprenant toutes les variables, à chaque étape, une variable est enlevée, et le nouveau modèle ainsi obtenu est comparé au modèle précédent avec des tests de rapports de vraisemblance, utilisant une estimation par maximum de vraisemblance. Les coefficients

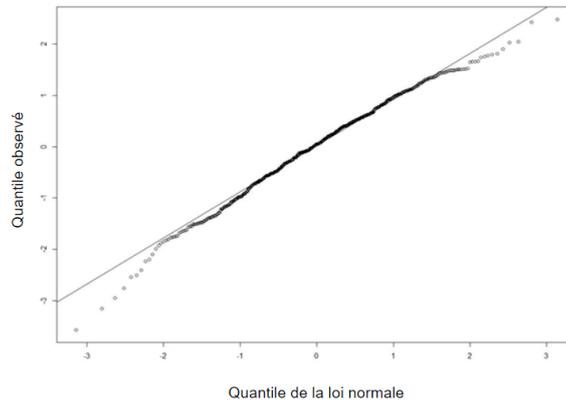


**FIGURE 7.29** – Graphe des résidus studentisés (à gauche), graphe d'autocorrélation (au centre) et d'autocorrélation partielle (à droite) pour le modèle obtenu par sélection automatique de variables.

de chaque nouveau modèle sont estimés par procédure par maximum de vraisemblance restreinte, alors que les modèles que nous avons conçus précédemment utilisaient une procédure de maximum de vraisemblance. Le modèle qui propose le meilleur compromis entre parcimonie et gain d'information était conservé et une nouvelle suppression de variable était effectuée. La procédure s'arrête quand aucune nouvelle suppression de variable n'améliore la qualité du modèle.

Le modèle produit par cette sélection est décrit en Annexe par le Tableau E.11. Les seuls coefficients ayant un effet sur le score d'empan visuo-attentionnel sont la temporalité du test ( $\beta = 0.31$ ,  $CI_{95} = [0.21; 0.41]$ ,  $p < 0.001$ ), l'interaction entre la temporalité du test et le temps passé sur l'Attrape-Lettre ( $\beta = 0.11$ ,  $CI_{95} = [0.01; 0.21]$ ,  $p < 0.05$ ) et, curieusement, le taux de réussite à la Forêt en T (groupe « plancher :  $\beta = -0.60$ ,  $CI_{95} = [-0.89; -0.31]$ ,  $p < 0.001$ , groupe « parseval 75 :  $\beta = -0.35$ ,  $CI_{95} = [-0.66; -0.04]$ ,  $p < 0.05$ ). La structure de covariance de type ARMA(1,1) a été spécifiée dans le modèle, et les résidus de celui-ci sont peu autocorrélés (voir Figure 7.29, présence d'autocorrélation aux délais 1 et 2 uniquement). Pour avoir une meilleure spécification du modèle, il serait possible d'effectuer une correction de la sur-dispersion des résidus, ce qui sera réalisé ultérieurement dans le cadre du projet Fluence.

Les résidus du modèle ne suivent pas une loi normale (voir Figure 7.30) : les points ne sont pas alignés le long de la première diagonale. Cela se traduit par des erreurs-type assez élevées pour l'intercept ( $std = 0.13$ ) et le coefficient associé à l'effet du taux de réussite à la Forêt en T ( $std = 0.16$ , respectivement  $std = 0.15$ , pour les effets de la modalité « taux de réussite entre 0.7 et 0.8 », respectivement « taux de réussite supérieur à 0.8 », par rapport à la modalité de référence). Nous avons tenté d'appliquer différentes transformations à nos variables (log,  $\log(1+x)$ , et racine carrée) pour obtenir des résidus normalement distribués, et avons constaté que cela modifiait les résultats de la procédure de sélection de variables : il arrive par exemple que l'interaction entre la temporalité du test et le coefficient d'accroissement du niveau  $K$  estimé soit à nouveau sélectionnée. Seul l'effet de la temporalité du test est sélectionnée



**FIGURE 7.30** – Diagramme quantile-quantile des résidus du modèle obtenu par sélection automatique de variable. Les abscisses représentent la valeur théorique des quantiles s'ils suivent une loi normale et les ordonnées leur valeur réelle.

quelle que soit la transformation utilisée.

## RÉSUMÉ DU CHAPITRE 7

Evasion a-t-il un impact sur les performances visuo-attentionnelles des élèves ? Quels sont les facteurs qui modulent son effet ? Voici les réponses qu'apportent ce chapitre :

- Evasion a été proposé à 356 élèves de CP de l'académie de Grenoble. 374 élèves de cette même académie utilisaient Luciole, un jeu d'entraînement à la compréhension de l'anglais oral. Les entraînements avaient lieu en classe sous la supervision des enseignants. Plusieurs dimensions cognitives, dont l'empan visuo-attentionnel et la performance en lecture ont été mesurées avant et après entraînement. Les résultats ont été analysés à l'aide de modèles multi-niveaux pour prendre en compte les caractéristiques inobservées de la classe et des élèves.
- On constate une amélioration significative de l'empan visuo-attentionnel après les entraînements sur l'ensemble de notre population. Cependant, cette évolution est la même pour les élèves qui ont joué à Luciole et ceux qui ont joué à Evasion. De même, aucune différence en terme de performances en lecture aux évaluations post-entraînement n'est observée entre ces deux groupes de joueurs.
- Notre hypothèse principale n'ayant pas été vérifiée, nous avons donc mené des analyses supplémentaires sur les données d'entraînement pour identifier quelles variables pouvaient avoir modulé l'évolution de l'empan visuo-attentionnel chez les élèves ayant joué à Evasion.
- Il s'avère que la qualité du suivi du protocole est très variable au sein de nos classes, à la fois en terme de durée totale d'entraînement, de durée quotidienne d'entraînement et de maintien de cette durée au cours du temps. Cependant, aucune différence n'a été constatée en terme d'évolution de l'empan visuo-attentionnel entre les classes les plus et les moins respectueuses du protocole.
- Les élèves semblent s'être démotivés rapidement : à la 5e semaine d'entraînement, la moitié des élèves dont les enseignants ont répondu au questionnaire semblent, selon ces derniers, s'être démotivés. Cependant la semaine de démotivation des élèves perçue par les enseignants n'a pas d'effet sur l'évolution de l'empan visuo-attentionnel suite à l'entraînement.
- Nos modèles suggèrent que le temps d'entraînement total et plus particulièrement le temps passé sur l'Attrape-Lettre pourrait avoir un effet sur l'évolution de l'empan visuo-attentionnel.
- Il existe des régimes d'entraînement différents au sein de notre population : environ la moitié des élèves a joué de manière équivalente à nos 4 mini-jeux et l'autre moitié a joué préférentiellement à l'Attrape-Lettre, au détriment équivalent des autres mini-jeux. Ces régimes d'entraînement semblent avoir un effet sur l'évolution de l'empan visuo-attentionnel suite à l'entraînement. Cependant cet effet est en fait confondu avec celui du temps d'entraînement passé sur l'Attrape-Lettre.
- Le taux d'accroissement du niveau estimé  $K$  au sein de l'Omelette semble avoir un effet sur l'évolution de l'empan visuo-attentionnel. Ce n'est pas le cas des autres mini-jeux.
- Le taux de réussite au sein des différents mini-jeux n'a pas d'effet sur l'évolution de l'empan visuo-attentionnel. Il a en revanche un effet sur le coefficient d'accroissement du niveau estimé  $K$  pour la Forêt en T et la Tour des Lettres. Contrairement à nos attentes cet effet est à la faveur des groupes dont le taux de réussite moyen est inférieur à 0.70.
- Le niveau estimé  $K$  est différent entre le début et la fin de l'entraînement pour l'Attrape-Lettre, la Tour des Lettres et l'Omelette.
- Les mini-jeux n'ont pas été appréciés de manière équivalente : une différence significative a été trouvée entre l'Attrape-Lettre et l'Omelette, au détriment de ce dernier.
- Les résidus de nos modèles ne sont pas indépendants, ce qui augmente le risque de faux positifs. Cependant, étant donné que notre analyse est exploratoire et que nous ne tirerons pas de conclusion vis-à-vis des modèles présentés, nous n'avons pas effectué de correction dessus.
- Une procédure de sélection automatique de variables montre, en plus des effets documentés précédemment, que le taux de réussite moyen à la Forêt en T pourrait expliquer les performances aux test d'empan visuo-attentionnel.

Ces différents points, qui sont à interpréter avec prudence, seront discutés dans le Chapitre 8 et serviront de base pour les ajustements proposés dans le Chapitre 9.

## Chapitre 8

# Évaluation d'Evasion en conditions réelles : Synthèse et discussion des résultats

L'objectif premier de ce travail de thèse était de concevoir et d'évaluer l'impact d'un logiciel d'entraînement de l'attention visuelle, Evasion, et son transfert éventuel sur les performances en lecture. Les résultats décevants que nous avons obtenus nous ont conduits à analyser en détail les données d'entraînement enregistrées par l'application au cours du jeu. Les effets estimés par nos modèles ne nous permettent pas de tirer des conclusions sur notre cadre théorique, étant donné que nous les avons conçus après avoir regardé nos données. Les signaux faibles qu'ils extraient de nos données nous suggèrent néanmoins des pistes d'amélioration en vue d'une expérience ultérieure.

Nous discutons ici deux explications possibles de l'absence d'effet différentiel entre les élèves ayant joué à Evasion et ceux ayant joué à Luciole : soit les mini-jeux d'Evasion n'entraînent pas suffisamment les dimensions attentionnelles impliquées en lecture, soit les conditions de mise en place de notre expérimentation étaient inadaptées aux contraintes du terrain. Nous articulerons la discussion autour de ces deux sujets. Les éléments que nous mettrons en avant dans ce chapitre serviront de base pour ajuster les prochaines versions du logiciel et modifier le protocole pour les expérimentations à venir, ce qui sera discuté dans le Chapitre 9.

### 8.1 Un entraînement qui ne mobilise pas suffisamment l'empan visuo-attentionnel ?

Le principal constat de cette thèse est l'absence de différence dans l'évolution de l'empan visuo-attentionnel entre les élèves ayant joué à Evasion et ceux ayant joué à Luciole. Les analyses statistiques révèlent, en outre, que les capacités de lecture des deux groupes d'élèves ne diffèrent pas non plus suite à l'entraînement. Comment expliquer que les performances d'empan visuo-attentionnel soient similaires pour les deux conditions d'entraînement ?

Luciole a été conçu spécifiquement pour ne pas entraîner l'empan visuo-attentionnel : ce jeu ne demande pas aux joueurs d'identifier des cibles visuelles multiples sous contrainte de temps. L'amélioration observée suite à l'utilisation de Luciole traduit vraisemblablement une évolution naturelle de l'empan visuo-attentionnel. Cela nous amène à la conclusion qu'Evasion n'a pas entraîné les capacités d'empan visuo-attentionnel des élèves. L'amélioration de

l’empan visuo-attentionnel entre le pré et le post-test est du même ordre dans le groupe Evasion que dans le groupe Luciole, suggérant dans les deux cas une manifestation de l’évolution normale de l’empan visuo-attentionnel au cours du développement de l’enfant (Bosse & Valdois, 2009). L’étude transversale de Bosse et Valdois (2009), effectuée auprès d’élèves de CP, CE2 et CM2 en l’absence d’entraînement, montre en effet que les capacités d’empan visuo-attentionnel évoluent dans le temps. Les enfants de CP ont en moyenne des capacités d’empan visuo-attentionnel inférieures à celles des enfants des classes de niveau supérieur. Les résultats d’une étude longitudinale (Valdois, Roulin, & Bosse, 2018) vont dans le même sens, montrant que les performances des élèves évoluent entre la grande section de maternelle et le CP.

### 8.1.1 Différences entre Evasion et les entraînements de l’empan visuo-attentionnel dont l’impact a été évalué

Les différences entre Evasion et les entraînements des dimensions de l’attention visuelle impliquées en lecture qui ont fait leur preuve peut éclairer notre absence de résultats. Par exemple, si l’on considère MAEVA, logiciel décrit à la Section 2.2.4 et dont l’efficacité à entraîner l’empan visuo-attentionnel a déjà été démontrée (Zoubrinetzky, Collet, N’Guyen-Morel, Valdois, & Serniclaes, 2018) auprès de participants dyslexiques, on constate qu’Evasion s’en démarque selon plusieurs points.

Premièrement, le temps de présentation des séquences à analyser dans les tâches de MAEVA est défini précisément entre 120 et 420 ms et ce temps tend à décroître au fur et à mesure de l’entraînement. Dans Evasion, plusieurs séquences sont présentées simultanément et en mouvement : le temps de présentation n’est pas le même que le temps disponible pour l’analyse visuelle. Par exemple, dans la Tour des Lettres, les séquences sont présentées pendant 5 s au maximum, mais le temps de traitement de chaque séquence dépend du nombre de séquences simultanément présentes. Dans l’Attrape-Lettre, le temps de présentation d’une séquence dépend de la vitesse de déplacement des stimuli proposée par Parseval et de leur emplacement au sein de la vague. Dans ces conditions, il est difficile d’estimer les temps de présentation avec précision. Nous pensions a priori avoir suffisamment contraint notre espace de difficulté sur le nombre de séquences et leur vitesse, et que de surcroît, les contraintes motrices (saccades oculaires, planification et exécution du geste) imposées par nos tâches renforceraient la nécessité de traiter rapidement les séquences affichées à l’écran. La proportion importante d’élèves (environ un tiers des joueurs d’Evasion) ayant un taux de réussite supérieur à 80% sur nos mini-jeux laisse penser que ce n’est pas le cas.

Deuxièmement, la longueur des séquences proposées par MAEVA va de 2 à 7 caractères, alors les séquences sont composées de 2 à 4 lettres dans Evasion. Cela pouvait se justifier dans la mesure où MAEVA était destiné à des tranches d’âge plus élevées (8-12 ans) que dans la cas d’Evasion (6-7 ans). Néanmoins, un nombre plus important de caractères visuels à traiter (les lettres dans le cas d’Evasion) renforce le besoin d’une plus grande quantité d’attention visuelle et d’une répartition plus étendue de l’attention. De plus, MAEVA fait varier la précision requise dans l’analyse des séquences présentées dans ses différentes tâches<sup>1</sup>, alors qu’Evasion demande invariablement le repérage d’une ou plusieurs différences entre la séquence à traiter et la référence présentée en début de vague. Ce dernier point concerne la variation dans le temps de la dispersion spatiale des ressources attentionnelles  $\sigma$  et est

1. « Est-ce que le stimulus suivant contient des éléments de la catégorie  $i$  ? » pour la plus facile des tâches, « dans le stimulus suivant, quelles catégories sont présentes et combien d’éléments de chacune y a-t-il ? » pour la plus difficile.

d’ailleurs l’un des critères définissant le jeu vidéo d’action. Bien que ces points ne puissent être confirmés par l’analyse des résultats, augmenter le nombre d’éléments à traiter est une façon relativement simple d’accroître la difficulté de traitement et donc l’engagement des ressources attentionnelles. Cela mériterait d’être exploré dans une seconde expérience.

Enfin, les séquences de lettres utilisées dans Evasion sont des bigrammes, des trigrammes ou des syllabes existants dans la langue, et sont donc des séquences visuellement familières. Notre entraînement diffère là encore de MAEVA (Lobier, 2008) dont les séquences contenaient des caractères de différents types (lettres latines, chiffres, formes géométriques quelconques, caractères hiraganas) formant des stimuli visuellement peu familiers. Or cette familiarité visuelle peut accélérer le traitement visuel des séquences. En effet, selon le modèle BRAID de reconnaissance visuelle de mots (Phénix, 2018), les contributions à l’identification d’une séquence de lettres proviennent à la fois des traitements perceptifs (contributions dont la qualité est modulée par l’attention visuelle) et des prédictions des connaissances lexicales. Du fait de l’appartenance des séquences familières à plusieurs mots existants dans la langue française, la contribution des représentations lexicales est plus grande pour leur identification que pour des séquences qui ne se prononcent pas. Cela pourrait avoir diminué le recours à l’attention visuelle et, par là même, son entraînement. Le besoin d’avoir des ressources attentionnelles largement réparties ou disponibles en plus grande quantité est alors moins critique pour résoudre nos mini-jeux que dans MAEVA.

### 8.1.2 Des mini-jeux trop faciles pour induire une amélioration de l’attention visuelle

L’analyse de l’évolution du niveau  $K$  estimé des élèves au cours du temps pour chaque mini-jeu va dans le sens des observations discutées précédemment. Celui-ci semble avoir progressé après 1h30 de jeu sur l’Attrape-Lettre, la Tour des Lettres et l’Omelette, mais pas pour la Forêt en T. Un apprentissage a donc eu lieu au sein des mini-jeux mais il n’a pas eu de conséquence sur le test de mesure de l’empan visuo-attentionnel. L’amélioration du niveau  $K$  estimé n’est peut-être pas assez forte pour induire un transfert. Les coefficients d’accroissement entre le début et la fin de l’entraînement estimés par les modèles J1 et J3 sont relativement faibles ( $\beta_1 = 0,36$  et  $\beta_3 = 0,22$ , respectivement), ce qui va dans le sens de cette explication. De plus, le niveau initial des élèves tel qu’estimé par la valeur de *intercept* –  $\frac{\beta}{2}$  est élevé (3,58 pour l’Attrape-Lettre et 3,66 pour la Tour des Lettres). Rappelons que les exercices appartiennent à un espace de difficulté allant de (0,0,0) à (5,5,5), et que la mesure de  $K$  moyennée ne peut donc pas aller au delà de 5 : ces valeurs initiales sont donc relativement élevées, et ne laissent qu’une petite marge de progrès (d’environ « 1,5 cran de difficulté »).

Il semblerait donc que ces deux mini-jeux soient trop faciles. Un examen visuel de l’évolution de  $K$  moyen au cours de l’entraînement semble confirmer cette interprétation : un plateau est atteint rapidement. Le coefficient estimé par le modèle J4 ( $\beta = 1,36$ ) est plus élevé, mais il concerne l’Omelette et le temps passé sur ce mini-jeu reste modeste (1 h et 14 min en moyenne,  $Sd = 36$  min). Par ailleurs, le fait que les élèves ne semblent pas avoir progressé à la Forêt en T est surprenant, dans la mesure où ce jeu partage deux dimensions de difficulté (longueur des séquences et similarité visuelle entre cible et distracteurs) avec les 3 autres mini-jeux. Les dimensions de similarité visuelle et de longueur de séquence, qui semblent être trop faciles sur l’Attrape-Lettre et la Tour des Lettres, doivent aussi l’être ici. Il est alors étonnant que le taux de réussite moyen à ce jeu soit si bas ( $M = 0.67$ ).

Il est possible que la dernière dimension, qui concerne la cadence d’apparition des couples de fantômes et leur vitesse de déplacement soit mal calibrée. Nous pensons que la cadence

d'événements d'intérêt est trop faible et que donc l'élève peine à maintenir son attention sur la tâche. Cela expliquerait le faible taux de réussite des élèves à ce mini-jeu.

### 8.1.3 L'Attrape-lettre, un mini-jeu plus efficace que les autres ?

Il se peut que les mini-jeux n'entraînent pas de la même manière le contrôle de la dispersion de l'attention visuelle,  $\sigma$ , et de la quantité totale de ressources attentionnelles disponibles,  $Qa$ . Le modèle T montre une interaction significative entre le temps passé sur l'Attrape-Lettre et la temporalité du test. Cela est peut-être dû au fait que l'Attrape-Lettre, ayant été en moyenne joué plus longtemps que les autres, est peut-être le seul jeu pour lequel la durée d'utilisation est suffisante pour avoir un effet sur l'amélioration de l'empan visuo-attentionnel. C'est sans doute ce point qui a été capturé par l'interaction entre le régime d'entraînement suivi par l'élève (pour rappel, préférence de l'Attrape-Lettre versus pratique équilibrée) et la temporalité du test des performances visuo-attentionnelles. Il serait intéressant de mener une analyse de survie sur nos données : ces méthodes permettent de calculer la probabilité d'occurrence d'un événement (par exemple, une amélioration de l'empan visuo-attentionnel entre nos évaluations pré et post-entraînement) en fonction d'une grandeur temporelle (le temps d'entraînement total). Nous n'avons malheureusement pas eu le temps de mener de telles analyses.

Une autre explication de l'effet de l'Attrape-Lettre sur l'évolution de l'empan visuo-attentionnel serait que les tâches qu'il contient mobilisent plus efficacement la quantité de ressources attentionnelles et leur dispersion dans l'espace. Pourtant, nous avons conçu nos différents mini-jeux de manière équivalente en respectant les propriétés définissant les jeux vidéo d'action, à savoir : haute vitesse, alternance entre une analyse locale et une analyse globale de la scène visuelle, imprévisibilité spatiale et temporelle, et forte charge perceptive, cognitive et motrice. A l'heure actuelle ces critères sont qualitatifs, il n'existe donc pas de seuil testé empiriquement qui garantisse le respect de chacun d'entre eux.

Ainsi, même si nous avons l'intention de créer des jeux équivalents, il se peut que ce ne soit pas le cas, en raison de nos choix de crans de difficultés et de paramètres libres (par exemple, le temps imparti pour trouver la cible de la Tour des Lettres). A la différence des autres mini-jeux où l'élève doit pointer l'item qu'il estime être la cible, il doit dans l'Attrape-Lettre déplacer le personnage de manière à ce qu'il soit positionné au bon moment dans le couloir contenant la cible. En ce sens, il induit potentiellement une charge, cognitive pour la planification du mouvement, et motrice pour la réalisation de ce mouvement, qui soit plus importante que pour les autres mini-jeux. C'est peut-être de ce fait le mini-jeu qui se rapproche le plus des jeux vidéo d'action, et serait donc le plus apte à entraîner l'attention visuelle. Pour tester cette hypothèse, il faudrait pouvoir comparer l'évolution de l'empan visuo-attentionnel des joueurs qui ont un temps d'entraînement total suffisant et des régimes d'entraînements qui favorisent d'autres jeux que le mini jeu 1. Notre population ne présente pas de sous-groupe de ce type, comme le suggère l'instabilité de l'application d'une procédure de partitionnement en 3 groupes.

Par ailleurs, une revue de Green et Bavelier (2012) fait l'hypothèse que l'effet bénéfique des jeux vidéo d'action sur différentes dimensions cognitives, dont l'attention visuelle, serait dû à la diversité des mécanismes (fonction exécutive, planification motrice, attention perceptive, etc.) engagés pour la résolution de la tâche. Au lieu de cibler l'une d'entre elles en particulier par des tâches bien identifiées, les jeux vidéo d'action proposent des configurations sans cesse renouvelées que le joueur doit apprendre à résoudre. Cette variété améliorerait le progrès de chacun de ces mécanismes ainsi que le transfert d'apprentissage à d'autres

tâches. Parmi nos mini-jeux, l’Attrape-Lettres est celui dans lequel le joueur doit, en plus de mobiliser efficacement ses ressources visuo-attentionnelles, planifier, exécuter et contrôler ses actions avec le plus de rigueur : ceci explique peut-être en partie l’effet de l’Attrape-Lettre sur l’empan visuo-attentionnel.

### 8.1.4 Effet du coefficient d’accroissement de $K$ de l’Omelette sur l’évolution de l’empan visuo-attentionnel

Dans nos analyses, nous avons aussi constaté que le seul coefficient d’accroissement du niveau estimé  $K$  de l’élève qui a un effet sur l’évolution de l’empan visuo-attentionnel après entraînement est celui de l’Omelette. L’Omelette est aussi le jeu dont le coefficient d’accroissement de l’évolution de  $K$  avant et après l’entraînement est le plus grand ( $\beta = 1.36$ ). Son taux de réussite étant le plus bas ( $M = 0.60, Sd = 0.19$ ), on pourrait penser, à priori, que son espace de difficulté est le plus stimulant. Cependant, la dispersion de  $K$  au sein de notre population ( $M_{Om} = 2.47, Sd_{Om} = 2.14$ ) suggère une autre interprétation, qui semble confirmée lorsque l’on regarde les graphes représentant l’évolution de  $K$  au cours du temps pour chaque élève. En effet, on se rend compte que trois profils d’élèves émergent : les élèves « plancher », qui restent très proche de l’origine de l’espace de difficulté, les élèves « plafond », qui sont au sommet de l’espace de difficulté, et, enfin, les élèves « plancher-plafond » qui passent brutalement du premier au second profil. Il serait intéressant de quantifier le nombre d’élèves présents dans chaque catégorie, avec des algorithmes de partitionnement de données longitudinales appliquées à l’évolution de  $K$  estimé au cours du temps.

Il y a deux explications possibles à ce phénomène. L’espace de difficulté de l’Omelette est peut-être mal calibré, avec des exercices difficiles dans les parties censées être les plus faciles. Il est aussi possible que notre jeu intègre une source de difficulté qui ne soit pas modélisée par nos dimensions de difficulté et qui empêche les élèves de réussir la tâche. Une fois la difficulté surmontée, le mini-jeu devient alors très facile.

Les observations recueillies lors des sessions pilotes effectuées en classe avant le déploiement des jeux semblent aller dans le sens de la deuxième hypothèse. Lors de ces sessions, les élèves avaient du mal à comprendre les consignes de l’Omelette : contrairement aux autres mini-jeux où il fallait agir directement sur la cible à identifier, l’Omelette demande à l’élève de surveiller et d’agir sur des éléments (les obstacles) dont il doit prévoir l’interaction avec la cible (l’obstacle bloque le chemin ou non). Pendant les sessions pilotes, il a fallu de nombreuses interventions des expérimentateurs pour que les enfants comprennent comment réussir le jeu. Nous espérons avoir résolu ce problème en modifiant le tutoriel vidéo qui précède le lancement de chaque mini-jeu et en demandant aux enseignants d’insister sur l’explication des consignes. Il semblerait néanmoins que des incompréhensions aient pu demeurer. Cela pourrait d’ailleurs expliquer le fait que l’Omelette ait été le mini-jeu le moins apprécié par les élèves selon leurs enseignants.

Il reste à expliquer l’effet positif du coefficient d’accroissement du niveau estimé  $K$  de l’élève au sein de l’Omelette sur l’évolution de l’empan visuo-attentionnel suite à l’entraînement. Peut-être qu’il capture en réalité l’effet d’un autre facteur : la ténacité des élèves. La ténacité (*grit*, en anglais) est la capacité des élèves à persévérer dans une tâche donnée. Du fait de consignes mal expliquées, il est possible que seuls les élèves les plus tenaces aient continué de jouer à l’Omelette malgré les échecs successifs et soient ceux qui atteignent les régions les plus difficiles de l’espace de difficulté. Or, la ténacité est liée à la capacité à réguler son propre apprentissage (Wolters & Hussain, 2015) et prédit notamment la réussite scolaire (Rimfeld, Kovas, Dale, & Plomin, 2016). Ainsi, les élèves les plus tenaces seraient à la fois

ceux qui ont le plus de chances de bénéficier de l'entraînement et ceux qui ont de grands coefficients d'accroissement de  $K$  à l'Omelette. L'effet de ce coefficient pourrait alors être une manifestation de l'effet positif de la ténacité sur l'apprentissage.

C'est peut-être aussi ce qui explique que notre procédure de sélection automatique de variable suggère un effet positif du taux de réussite à la Forêt en T sur les scores d'empan en général : les élèves qui parviennent à maintenir leurs ressources attentionnelles sur le mini-jeu de manière à avoir un taux de réussite supérieur à 0.80 sont peut-être aussi ceux qui parviennent à maintenir efficacement leur attention durant la passation des tâches de report. Il serait intéressant de voir si les élèves avec un haut taux de réussite à la Forêt en T sont aussi ceux avec un haut taux d'accroissement du niveau  $K$  estimé à l'Omelette. C'est malheureusement une analyse que nous n'avons pas encore pu effectuer.

## 8.2 Fonctionnement de Parseval

Bien que des simulations effectuées par les concepteurs de Parseval (Diard et al., 2010) suggèrent que cet algorithme fonctionne, les données recueillies durant le projet Fluence permettent de juger de son efficacité en condition réelle.

Les résultats des analyses réalisées sur le taux de réussite lors de l'entraînement montrent que celui-ci est proche de 0.75 pour l'Attrape-Lettre et la Tour des Lettres, ce qui correspond au niveau attendu, mais il est plus bas pour la Forêt en T et l'Omelette. Or, ces deux mini-jeux présentent des limites, que nous avons décrites précédemment et qui nuisent à l'engagement des élèves dans la tâche à résoudre. Ce dernier point peut diminuer le taux de réussite des élèves alors que Parseval fonctionne correctement. En particulier, l'observation d'un taux de réussite le plus bas pour les configurations les plus faciles suggèrent que les élèves se sont peut-être parfois désengagés totalement, laissant le jeu tourner sans interaction. Ces taux bas ont pu, mathématiquement, artificiellement faire baisser le taux moyen de réussite. De plus, pour compenser localement cette baisse de performance, l'algorithme a pu sous-estimer le niveau  $K$  de l'élève : ceci n'aiderait pas au ré-engagement.

Pour avoir plus d'information sur le fonctionnement de l'algorithme, nous nous sommes intéressés à l'évolution du taux de réussite au sein des espaces de difficulté rattachés à l'Attrape-Lettre et la Tour des Lettres. Celui-ci est constant le long des trois dimensions, hormis pour les configurations les plus difficiles de la Tour des Lettres, et les configurations les plus faciles que nous venons de discuter. Il semblerait donc que Parseval fonctionne correctement.

Cependant, l'effet du taux de réussite sur l'accroissement du niveau  $K$  estimé ne correspond pas à nos prédictions. Nous pensions en effet qu'un taux de réussite compris entre 70 et 80%, donc proche de la consigne de Parseval, induirait les plus grands progrès au sein du mini-jeu. Or, celui-ci n'a un effet que pour la Forêt en T et la Tour des Lettres, et le groupe qui a l'effet positif le plus grand sur le coefficient d'accroissement du niveau  $K$  est celui dont le taux de réussite est inférieur à 70%. Il est possible que la valeur du taux de réussite consigne fixée à 75% ne soit pas la bonne. Celle-ci a été choisie en se basant sur la littérature théorique portant sur la Zone Proximale de Développement (voir Chapitre 6) qui préconisait de cibler un niveau « intermédiaire » de difficulté. La valeur de 75% a donc été retenue car se situant habituellement à mi-chemin entre le taux de réussite d'une réponse donnée au hasard (50%) et le taux de réussite associé à une maîtrise parfaite de la tâche (100%). Le taux de réussite était donc placé à un niveau intermédiaire censé être optimal pour l'apprentissage.

Or, dans nos tâches, le taux de réussite d’une réponse au hasard n’est pas à 50%. Par exemple, dans la Tour des Lettres, si 10 portes sont présentes, le joueur a 10% de chance de choisir la bonne porte s’il répond au hasard. Le taux de réponse au hasard des autres mini-jeux est difficile à calculer a priori, et n’est pas constant dans l’espace de difficulté. C’est peut-être pour cela qu’il n’y a pas de différence entre les groupes en fonction de leur taux de réussite pour la Forêt en T et l’Omelette. Pour se placer à un niveau de difficulté intermédiaire, il faudrait donc tout d’abord identifier la valeur du taux de réussite correspondant au hasard pour chaque mini-jeu. Nous pourrions alors estimer la relation entre la distance avec ce taux de réussite au hasard et le gain de performance de l’entraînement selon le taux de réussite contrôlé par Parseval. C’est un point qu’il faudrait vérifier expérimentalement.

### 8.3 Un protocole qui ne répond pas aux besoins du terrain ?

Les recherches qui comparent l’efficacité de différents dispositifs pédagogiques peuvent être séparées en trois groupes :

- des recherches fondamentales<sup>2</sup> conduites en laboratoire sous la supervision d’un expérimentateur, avec une population qui excède rarement et à peine la centaine, organisée en groupes très restreints ;
- des recherches intermédiaires, conduites en classe sous la supervision d’un expérimentateur, avec une population de plusieurs centaines d’élèves réparties en groupes dont la taille est inférieure à celle de leurs classes ;
- des recherches écologiques<sup>3</sup>, conduites en classe sous la supervision de l’enseignant, avec une population supérieure allant de 500 à plusieurs milliers d’élèves, en groupes dont la taille dépend de la volonté de l’enseignant (classe entière, demie-classe, etc.).

Fluence est sans conteste un projet de recherche écologique. Or, la complexité propre à ce type d’expérimentation pourrait avoir compromis la mise en évidence de différences significatives entre les élèves de nos deux groupes expérimentaux, et nous allons expliquer ici pourquoi.

#### 8.3.1 Comparaison de notre étude avec Skies of Manawak, un projet de recherche intermédiaire en classe sur l’effet des jeux vidéo d’action

Par chance, une expérience qui partage certaines caractéristiques avec la nôtre mais que l’on peut qualifier de recherche intermédiaire a été menée en même temps que le projet Fluence par l’Université de Trente (Pasqualotto, Altarelli, Menestrina, Bavelier, & Venuti, 2018). Les auteurs ont étudié l’effet de « Skies of Manawak », un ensemble de mini-jeux d’action développés pour entraîner plusieurs fonctions cognitives dont l’attention visuelle, sur les performances scolaires. Le mini-jeu censé cibler spécifiquement l’attention visuelle des joueurs ressemblait beaucoup à l’Attrape-Lettre : dans un décor en mouvement constant, un

---

2. Le terme « fondamental » est choisi ici par opposition aux recherches intermédiaires et écologiques. Il existe évidemment des recherches encore plus « fondamentales » que celles décrites ici, comme par exemple celles qui étudient la relation entre une dimension cognitive et un apprentissage scolaire.

3. On parle aussi parfois de recherches « quasi-expérimentales » pour rendre compte de la difficulté à contrôler avec précision les stimuli utilisés. Cependant, ce terme ne rend pas compte à nos yeux de l’échelle à laquelle est réalisée l’expérience et laisse penser que leur manque de rigueur est incompressible.

avatar présent en haut à gauche de l'écran était attaché à une position précise autour de laquelle il pouvait se déplacer pour attraper ou éviter des objets qui arrivaient vers lui. Nous partageons le même cadre théorique sur l'effet positif des jeux vidéo d'action sur l'attention visuelle et son transfert sur les performances en lecture. Le protocole de cette expérience présentait beaucoup de similarités avec le nôtre : les entraînements ont eu lieu en classe et les performances cognitives des élèves ont été mesurées avant et après entraînement. Le groupe contrôle jouait à une application ludique d'apprentissage du code, Scratch (MIT Media Lab).

Il différait cependant par sa durée d'entraînement (12h en tout, soit 2h de plus que notre protocole), le nombre et l'âge des participants (150 enfants du CE1 à la 6<sup>e</sup>) et par le fait que les entraînements ont été réalisés sous la supervision des expérimentateurs. Ces derniers étaient présents dans la même pièce que les enfants pendant les entraînements. Ils les encourageaient s'ils se démotivaient et leur expliquaient les consignes s'ils ne les comprenaient pas. A la fin de l'entraînement, les auteurs ont constaté une différence en terme d'évolution de l'attention visuelle entre les élèves ayant joué à leur jeu et ceux ayant joué à un jeu contrôle. Les dimensions de l'attention visuelle évaluées par les chercheurs ne sont pas les mêmes que les nôtres : ils ont utilisé des épreuves de barrage, c'est-à-dire de recherche visuelle sérielle sans contrainte liée au temps de présentation. Cette absence de contrainte temporelle limite le besoin d'avoir des ressources largement réparties sur la scène visuelle, car la recherche peut être effectuée de manière sérielle.

Cependant, l'amélioration induite par Skies of Manawak sur l'attention visuelle (et d'autres dimensions cognitives) se répercute sur les performances scolaires, mais seulement 18 mois après la fin du protocole. L'effet positif de Skies of Manawak sur les performances des élèves peut s'expliquer de deux manières : soit la durée de notre entraînement, inférieure à celles des entraînements proposés par Pasqualotto et al. (2018) et Franceschini et al. (2013), n'est pas suffisante pour induire une amélioration de l'empan visuo-attentionnel, soit la complexité des expériences écologiques a introduit trop de variabilité dans le suivi de notre protocole. Le logiciel d'entraînement de l'empan visuo-attentionnel MAEVA ayant montré un effet significatif sur les performances des participants en tâche de report après seulement 7h30 d'entraînement (Zoubrinetzky, 2015), la deuxième explication nous semble plus probable.

### 8.3.2 Difficulté de la mise en place des expériences écologiques

Dans notre projet, les entraînements ont été menés par des enseignants qui doivent concilier les besoins de la recherche avec le quotidien de leur classe et n'ont, pour la plupart, pas de formation en méthodologie expérimentale. Ces points semblent introduire une grande variabilité dans l'application des consignes d'entraînement et/ou la mise en place de pratiques pédagogiques particulières. En effet, une étude commandée par l'Institute of Education Science (U.S. Département of Education) a comparé l'effet de 4 interventions pédagogiques sur les compétences en compréhension de texte comparé à un enseignement classique (James-Burdumy et al., 2012). Toutes étaient basées sur des résultats scientifiques, et l'une d'elle a même fait au préalable l'objet d'une évaluation. Utilisés pendant 6 semaines dans 200 classes de CM2 aux Etats-Unis, ces programmes pédagogiques ont été mis en place par les enseignants, qui ont été formés entre 6h et 18h selon le programme qui leur a été attribué. A la fin de la première année, aucune différence n'a été trouvée entre les groupes ayant suivi l'un de ces programmes et le groupe contrôle. Les enseignants rapportaient pourtant massivement avoir appliqué le programme tel qu'ils l'avaient appris en formation, et leur niveau de compréhension du programme avait bel et bien évolué. Cependant, des observations menées

sur le terrain ont montré que, contrairement à leurs affirmations, les enseignants n’avaient pas respecté les consignes d’application et que leur pratique n’avait en fait pas changé. Cet exemple montre, qu’avant d’évaluer l’impact d’un dispositif, il est nécessaire d’évaluer la qualité de l’appropriation de ce dispositif par les intervenants qui en assurent la mise en œuvre en classe.

Un écart entre les prescriptions du protocole et la réalité de mise en œuvre sur le terrain est aussi présent dans nos données : la durée individuelle d’entraînement, la durée des sessions quotidiennes d’entraînement et le maintien de celle-ci au cours du temps est très variable d’une classe à l’autre. C’est d’ailleurs une originalité de ce travail : si d’autres études observent ponctuellement les pratiques des enseignants dans la classe (James-Burdumy et al., 2012), nous avons pu collecter des informations sur tous nos participants pendant la totalité de l’entraînement, grâce aux traces d’exécution des logiciels. A partir de ces données, nous avons donc séparé nos classes en fonction de la rigueur avec laquelle le protocole avait été suivi. Pour autant, nous n’avons constaté aucune différence en terme d’évolution de l’empan visuo-attentionnel suite à l’entraînement entre les classes qui ont bien respecté les consignes d’application et celles dont les pratiques ont été plus approximatives. L’absence de différence entre le groupe Luciole et le groupe Evasion ne semble donc pas explicable par une mauvaise application des consignes du protocole au sein de groupe Evasion.

La piètre qualité du suivi de notre protocole ouvre notre discussion sur l’implémentation de dispositifs « evidence-based » en général. Si l’on fait le bilan des expériences écologiques qui ont été menées jusqu’à présent, celui-ci est très mitigé. En effet, l’Institute of Education Science a réalisé 77 expérimentations randomisées contrôlées entre 2002 et 2011. Seules 7 études ont montré un effet des dispositifs évalués alors que ces derniers étaient pour la plupart fondés sur des données issues de la littérature scientifique (Condelli et al., 2010). Il est difficile de savoir si cette absence de résultat est due à un défaut d’implémentation de la méthode ou si ces dispositifs correctement implémentés ne sont pas adaptés à certaines configurations locales (par exemple, un niveau de la classe insuffisant pour aborder certaines notions). C’est pour cela que, au delà de la simple évaluation des dispositifs pédagogiques, il faut également tester les méthodes avec lesquelles elles sont introduites en classe.

### 8.3.3 Pistes d’amélioration de l’engagement, de la formation et de l’accompagnement des enseignants participants à une expérience écologique

Nous l’avons vu dans les travaux mentionnés précédemment, l’adoption du dispositif que l’on souhaite tester par les enseignants n’est pas immédiate. Ce constat est renforcé par le détail des analyses de l’étude de James-Burdumy et al. (2012) qui comparait l’effet de plusieurs programmes de renforcement de la compréhension de texte. Celle-ci a été menée sur 2 ans, et ce n’est qu’au bout de cette période et en restreignant l’analyse des résultats aux enseignants qui ont réalisé l’expérience sur les deux années consécutives que l’effet positif de l’un des programmes a été mis en évidence. L’observation des pratiques des enseignants montre que ce n’est qu’à partir de la deuxième année qu’ils ont réussi à intégrer les programmes au sein de leur classe. Cela suggère qu’il faut un certain temps aux intervenants d’une expérience écologique pour s’approprier les outils, temps qui est peut-être difficilement compressible.

Vu l’importance de l’enjeu des études écologiques (proposer des pratiques et des outils qui aient un impact avéré sur les élèves) et leur haut niveau de risque, il est curieux que les leviers pour améliorer le suivi de leur protocole soient si peu étudiés. A notre connaissance,

seuls quelques ouvrages de références existent (Fixsen, Naoom, Blase, Friedman, & Wallace, 2005 ; Kelly & Perkins, 2012), mais ceux-ci sont très transdisciplinaires et la plupart des études qu'ils référencent souffrent souvent d'un faible niveau de preuve. Leur lecture suggère cependant plusieurs pistes pour améliorer le suivi de notre protocole, à savoir étudier l'adhésion des enseignants vis-à-vis de notre projet avant son lancement, rallonger et modifier la nature de leur formation et renforcer leur accompagnement tout au long du projet.

### 8.3.3.1 L'adhésion des enseignants, un pré-requis à évaluer

L'un des premiers écueils qui peut compromettre le suivi du protocole expérimental est le manque d'adhésion des intervenants à suivre ce projet, dans notre cas les enseignants (Fixsen et al., 2005). Le degré « d'adhésion » des intervenants (en anglais, *readiness*) peut s'analyser en deux sous-notions : leur attitude<sup>4</sup> vis-à-vis du projet et la confiance qu'ils éprouvent dans leur capacité à le mettre en place. Le degré d'adhésion des intervenants a un impact sur la manière dont ils suivent le protocole. Par exemple, lorsqu'ils sentent que le projet leur fait prendre un risque (perte de temps, coût par rapport à leur objectif personnel, etc.), cela diminue leur adhésion et la qualité avec laquelle ils appliquent les procédures préconisées (Panzano & Roth, 2006).

Il semble donc important d'évaluer leur degré d'adhésion avant le démarrage d'une expérimentation pédagogique. Cela permet d'agir sur leur attitude ou sur les moyens dont ils disposent avant le lancement de l'expérimentation et de prévenir ainsi leur éventuelle démobilisation. Une échelle d'évaluation de l'adhésion des intervenants (Aarons, 2004 ; Aarons, Glisson, Hoagwood, Landsverk, & Cafri, 2010) ainsi qu'un modèle des différents degrés d'adhésion ont été proposés (Edwards et al., 2000). Cependant, la première ne s'applique qu'à des problématiques restreintes (l'adoption de pratiques fondées sur la preuve dans le domaine de la psychiatrie), et le second n'a pas été évalué expérimentalement. Il serait en tout cas intéressant de mettre en place une telle échelle avant la mise en place d'une expérience écologique en classe pour augmenter sa fiabilité. Dans notre protocole, nous n'avons pas collecté ce type d'information, et peut-être qu'une telle échelle nous aurait permis d'expliquer la variabilité du suivi du protocole que nous avons constatée.

### 8.3.3.2 La formation des enseignants, un incontournable à ne pas sous-dimensionner

La durée et la nature de la formation proposée aux intervenants contribuent aussi au bon déroulement de l'expérience. C'est un point soulevé dans l'étude menée par Gentaz et al. (2013), au cours de laquelle l'impact d'un programme d'entraînement à la lecture a été évalué auprès de 1806 élèves en Réseau d'Éducation Prioritaire. Dans ce projet, les enseignants avaient été formés 18 h (3 jours de formation) avant le lancement du projet, puis 24 h durant l'année d'expérimentation. Un site web avait aussi été mis en place pour leur permettre de partager les manières d'implémenter l'entraînement dans la classe. Malgré le fait que ce programme se basait sur des travaux récents sur l'apprentissage de la lecture, aucune différence en terme d'évolution des performances en lecture n'avait été observée entre le groupe ayant utilisé le programme et le groupe contrôle. Les auteurs pointent les fortes contraintes temporelles qui ont pesé sur le déroulement du projet et qui les ont empêché de

---

4. Le terme « attitude » est utilisé ici tel que défini par la psychologie sociale, à savoir une évaluation d'un objet de pensée (Bonher & Dickel, 2011), en l'occurrence le protocole lui-même et les objectifs qu'il souhaite atteindre.

mettre en place une formation plus aboutie, où les interactions du programme avec les outils déjà présents en classe auraient été étudiées plus en détail.

Une autre expérimentation que nous qualifierons d’écologique, bien qu’elle n’ait été menée que sur 250 élèves, se distingue par l’intensité de la formation qu’elle a proposé aux enseignants participants (de Kock & Harskamp, 2014). L’objectif des chercheurs était d’évaluer l’impact d’une méthode pédagogique mettant l’accent sur la métacognition sur la résolution de problèmes de mathématiques. Les entraînements étaient menés par les enseignants eux-mêmes. Ils avaient été formés lors de groupes de travail, pendant lesquels ils ont pu tester leur propre métacognition et les étapes du programme d’entraînement. Les enseignants ont mutuellement analysé leur stratégie de résolution de problèmes. Chercheurs et enseignants ont ensuite collaboré pour concevoir des séquences pédagogiques incluant le programme d’entraînement à tester. La durée totale de la formation n’est cependant pas précisée. A la fin du programme, les élèves qui ont suivi l’entraînement à la métacognition ont amélioré leurs performances en résolution de problèmes en comparaison avec les élèves du groupe contrôle.

Dans un domaine bien différent du nôtre, une étude de Schofield, Edwards, et Pearce (1997) a comparé deux manières de sensibiliser les écoles aux risques de l’exposition au soleil. Le premier groupe d’écoles avait reçu une simple documentation écrite, alors que le deuxième groupe avait reçu en plus de cette documentation plusieurs sessions de formation où des acteurs du projet avaient présenté le programme à appliquer. Lorsque les auteurs ont évalué l’application des recommandations dans les établissements, ils n’ont trouvé aucune différence entre ces deux groupes. Il semblerait ainsi que toutes les formations en présence d’un formateur ne se valent pas, et que leur impact dépende de leur durée et de leur nature.

Dans notre projet, nous avons prévu une formation de deux jours (soit environ 16 h) avant le lancement des expérimentations. Les chercheurs du projet Fluence ont présenté un état des lieux des recherches autour de l’apprentissage de la lecture et de l’anglais, et ont fait une démonstration du fonctionnement d’Evasion. Les enseignants ont été invités à essayer le logiciel, ainsi qu’à partager leurs pratiques et leurs ressources pour enseigner la lecture. Pour des raisons de temps, nous n’avons cependant pas poussé la formation jusqu’à la conception de séquences pédagogiques dans lesquelles s’intégreraient l’utilisation d’Evasion. Du fait de l’étalement géographique des classes sur 5 départements (point aussi mentionné par Gentaz et al. (2013)), ces formations ont été faites une seule fois au sein de chaque département, à plusieurs dizaines d’enseignants en même temps.

La durée de notre formation est équivalente à celle de James-Burdumy et al. (2012) et Gentaz et al. (2013), or ni ces projets, ni le nôtre, n’ont eu l’effet escompté : cette durée est sans doute trop faible pour permettre la bonne application d’un protocole expérimental précis. Même si notre logiciel peut être utilisé hors d’une séquence pédagogique, le succès du logiciel de de Kock et Harskamp (2014) suggère que penser en amont son inclusion au sein d’une séquence pédagogique améliore le suivi du protocole.

### **8.3.3.3 L’accompagnement des enseignants, un support essentiel à la collaboration entre chercheurs et enseignants**

Il semblerait aussi que l’accompagnement des intervenants d’une expérience tout au long du projet soit essentiel. Celui-ci peut être de deux types : soit par des échanges directs avec les chercheurs du projet, soit par le moyen d’indicateurs de suivi lisibles (Fixsen et al., 2005). Ce dernier point est d’ailleurs mentionné dans l’étude de de Kock et Harskamp (2014) : les enseignants du projet recevaient chaque semaine par e-mail les enregistrements des performances de leurs élèves, ce qui leur permettait de voir leurs progrès aux tâches

proposées. C'est pour cette raison que nous avons mis en place une interface web pour donner aux enseignants des indicateurs (durée, performance, etc.) sur le déroulement de l'entraînement de leurs élèves.

Malheureusement, rares sont les études qui comparent l'implémentation d'un même dispositif en faisant varier l'accompagnement des intervenants. La seule que nous avons trouvée concerne l'adoption de bonnes pratiques dans les services de psychiatrie (Fairweather, Sanders, & Tornatzky, 1974). Deux groupes d'hôpitaux avaient été formés. Le premier recevait des informations par des fiches informatives, un manuel qui leur était distribué et des appels téléphoniques réguliers avec des consultants du projet. Ils avaient aussi la possibilité d'appeler ces mêmes consultants dès qu'ils en éprouvaient le besoin. Le second groupe bénéficiait des mêmes ressources que le premier, mais avait en plus des réunions avec les consultants tout au long du projet pour faire le point sur l'adoption des prescriptions du projet. A la fin de l'étude, une différence significative avait été observée entre les deux groupes en terme de respect du protocole, à la faveur des hôpitaux du second groupe, qui ont bénéficié de réunions avec les consultants tout au long de l'étude.

Dans le cas du projet Fluence, même si la formation initiale des enseignants avait lieu en présence des chercheurs, le suivi s'est fait ensuite uniquement à distance, et, hormis pour discuter de l'organisation du projet (mise en place des pré et post test, déploiement d'une mise à jour du logiciel), ces discussions étaient initiées à la demande des enseignants. Là encore, peut-être que cet accompagnement minimal n'a pas suffi à maintenir l'engagement des enseignants dans le projet.

Concernant l'interface enseignant, une analyse des données du questionnaire menée au sein du projet Fluence indique qu'à partir de la semaine 5, près de la moitié des enseignants ne l'utilisaient plus. Seuls 2 enseignants ont déclaré l'avoir utilisée régulièrement pour suivre le temps d'entraînement de leurs élèves. Cinq enseignants déclarent ne l'avoir jamais utilisée pendant l'entraînement de leurs élèves. La majorité des enseignants estiment que leur expérience utilisateur pour visualiser les traces d'entraînement était moyennement satisfaisante. Ces éléments suggèrent que certains enseignants ont éprouvé des difficultés à interagir avec cette interface web. Cela explique peut-être le faible taux d'utilisation et le suivi insuffisant du protocole expérimental.

# Chapitre 9

## Conclusion – Ajustements et perspectives

“We are faced with the paradox of non-evidence-based implementation of evidence-based programs.”

(DRAKE, GORMAN, & TORREY, 2002)

Ce projet de thèse a couvert l'intégralité des étapes d'un projet de recherche écologique, allant de la conception du dispositif à tester jusqu'à l'évaluation de son impact en conditions réelles. Sa réalisation nous a apporté des éléments qui nous permettront d'ajuster le protocole en vue d'une nouvelle expérimentation du projet Fluence qui sera prochainement lancée dans l'académie de Mayotte auprès de 746 élèves de CP. Le bilan que nous pouvons faire suite à l'expérimentation qui a porté sur les élèves de CP dans l'académie de Grenoble permet de dégager de nouvelles perspectives scientifiques et organisationnelles pour améliorer la méthodologie du projet et, plus largement, des expériences écologiques. Dans ce chapitre, nous ferons un résumé du travail effectué puis nous discuterons successivement des points précédents, ce qui constituera la conclusion de ce travail de thèse.

### 9.1 Résumé

**Chapitre 2** Dans le chapitre 2 de revue de littérature, nous avons rappelé les études démontrant l'importance des processus visuo-attentionnels impliqués en lecture, en nous focalisant plus précisément sur la notion d'empan visuo-attentionnel. L'empan visuo-attentionnel correspond à la mesure du nombre d'items distincts qui peuvent être traités simultanément en une fixation ; il reflète les ressources attentionnelles qui sont mobilisées lors du traitement. Le rôle de l'empan visuo-attentionnel dans la lecture experte et l'apprentissage de la lecture est bien documenté. Son entraînement par des tâches d'identification, de catégorisation et de recherche visuelle permet d'améliorer les performances en lecture de personnes dyslexiques. L'empan visuo-attentionnel est particulièrement impliqué dans la vitesse de lecture et, de ce fait, il apparaît comme un processus central pour améliorer la « fluence » en lecture. L'empan visuo-attentionnel était la cible de l'entraînement que nous avons conçu dans cette thèse afin de contribuer à améliorer le niveau de lecture des apprentis-lecteurs et prévenir les difficultés d'apprentissage de la lecture (projet FLUENCE).

**Chapitre 3** L'objectif du chapitre 3 était de clarifier les dimensions attentionnelles qui sous-tendent l'empan visuo-attentionnel. Nous sommes partis de résultats expérimentaux sur

l'attention visuelle en général, que nous avons articulés avec le modèle d'attention visuelle en lecture récemment implémenté par notre équipe dans le cadre du modèle computationnel de reconnaissance de mots (le modèle BRAID) pour élaborer un « modèle conceptuel » mathématique de l'attention adapté aux scènes visuelles 2D. Ce modèle considère que l'attention visuelle est décrite par une quantité  $Qa$  de ressources, dont la distribution spatiale suit une distribution gaussienne 2D dont le sujet peut contrôler le centre  $\mu$  et la dispersion  $\sigma$ . Dans ce cadre, les simulations effectuées avec BRAID suggèrent que la mesure de l'empan visuo-attentionnel dépend à la fois de la quantité totale de ressources attentionnelles disponibles et de leur dispersion dans l'espace. Ces deux dimensions sont vraisemblablement celles à entraîner pour induire une amélioration de l'empan visuo-attentionnel.

**Chapitre 4** Nous nous sommes ensuite intéressés, dans le chapitre 3, aux jeux vidéo d'action, dont la pratique a un effet sur l'attention visuelle en général, ce qui a été montré dans de nombreuses expériences. Nous avons passé en revue plusieurs de ces expériences, qui comparent l'effet d'un entraînement à base de jeux vidéo d'action ou d'un jeu contrôle sur les performances attentionnelles des participants. Nous avons proposé une interprétation unifiée de ces observations par notre formalisme mathématique. Dans cette interprétation, les jeux vidéo d'action cibleraient eux aussi la quantité totale de ressources attentionnelles disponibles et leur dispersion dans l'espace. Ils feraient donc des candidats idéaux pour entraîner l'attention visuelle des apprentis lecteurs. Deux types de résultats viennent conforter cette hypothèse : les résultats d'études montrant l'effet des jeux vidéo d'action sur les performances en lecture d'enfants dyslexiques, et les résultats d'une étude montrant que les joueurs de jeux vidéo d'action ont à la fois un empan visuo-attentionnel plus grand que celui des non-joueurs et de meilleures aptitudes de lecture de mots nouveaux en temps limité.

**Chapitre 5** Dans le chapitre 5, nous avons utilisé les apports des chapitres précédents pour concevoir Evasion, un logiciel d'entraînement de l'empan visuo-attentionnel. Evasion est une application tablette destinée à être utilisée en classe pour améliorer les performances en lecture d'élèves de CP. Elle utilise les tâches dont l'effet sur l'empan visuo-attentionnel a été montré. Elle reprend les 4 propriétés définissant les jeux vidéo d'action, à savoir des événements qui se déroulent rapidement, une alternance entre les stratégies globale et locale d'analyse de la scène, une forte imprévisibilité spatiale et temporelle et une forte charge perceptive, cognitive et motrice. Evasion est un ensemble de 4 mini-jeux, chacun associé à un espace de difficulté dont nous avons spécifié les dimensions.

**Chapitre 6** Evasion intègre un algorithme original d'adaptation de la difficulté en fonction des performances de l'utilisateur, l'algorithme Parseval Diard et al. (2010). Dans ce chapitre, nous avons présenté l'intérêt de l'adaptation de la difficulté pour améliorer le bénéfice d'un entraînement et passé en revue les algorithmes qui ont jusqu'à présent été testés expérimentalement. Face au manque d'implémentations ou de spécifications mathématiques opérationnelles de ces algorithmes, nous avons également considéré les méthodes d'adaptation de la difficulté issues de la psychométrie adaptative. Celles-ci ont inspiré la conception de Parseval par notre équipe, un algorithme original, multi-dimensionnel et adaptable à n'importe quelle tâche d'entraînement. L'algorithme a été conçu pour fixer le taux de réussite des joueurs à 75% de réussite, valeur fixant un niveau intermédiaire de difficulté.

**Chapitre 7** Le chapitre 7 décrit l'expérimentation que nous avons menée dans l'académie de Grenoble pour évaluer l'impact d'Evasion sur l'empan visuo-attentionnel et l'appren-

tissage de la lecture. 750 élèves ont joué soit à *Evasion*, soit à *Luciole*, un jeu contrôle d'apprentissage de la compréhension orale en anglais. Nous avons mesuré avant et après entraînement les performances d'empan visuo-attentionnel de nos participants ainsi que leur niveau de lecture. Les résultats montrent que l'évolution de l'empan visuo-attentionnel est similaire dans les deux groupes quel que soit l'entraînement proposé, suggérant qu'*Evasion* ne remplit pas sa mission d'entraînement de l'empan visuo-attentionnel. Nous avons donc mené des analyses supplémentaires sur les données recueillies pendant l'entraînement afin de comprendre la nature des facteurs ayant contribué à cette absence d'effet. Les résultats de ces analyses post-hoc suggèrent que le temps d'entraînement est un facteur limitant. En effet, nous observons que le temps passé sur l'*Attrape-lettre* interagit avec l'amélioration de l'empan visuo-attentionnel, ce mini-jeu étant aussi le plus utilisé des 4. Les résultats des analyses suggèrent également un effet de l'évolution au cours de l'entraînement du niveau de performance au jeu de l'*Omelette*, ainsi qu'un effet du taux de réussite au jeu des fantômes sur les performances des élèves aux tâches mesurant les capacités d'empan visuo-attentionnel.

**Chapitre 8** Dans le chapitre 8, nous avons proposé une synthèse et interprétation des résultats présentés dans le chapitre 6. Nous y discutons principalement le rôle potentiel de deux facteurs pour expliquer l'absence de différence entre les élèves ayant joué à *Evasion* et à *Luciole* : les propriétés des mini-jeux qui composent *Evasion* et la nature du protocole d'entraînement. Il semblerait que l'*Attrape-Lettres* soit le seul qui ait un impact sur l'évolution de l'empan visuo-attentionnel. Cependant, il est possible que nos mini-jeux soient en réalité trop faciles ou qu'ils aient été joués trop peu longtemps pour induire une amélioration de l'empan visuo-attentionnel. L'effet du temps passé sur l'*Attrape-Lettre* pourrait aussi s'expliquer par le fait que, contrairement à notre volonté initiale, ce jeu se rapproche davantage que les trois autres d'un jeu vidéo d'action. L'effet du coefficient de progrès du niveau estimé  $K$  au cours de l'entraînement sur l'évolution des performances attentionnelles, observé sur l'*Omelette*, mini-jeu qui n'a été ni bien compris ni apprécié des élèves, pourrait être la manifestation de l'effet de la ténacité sur la capacité à bénéficier de l'entraînement. Concernant le protocole, il s'avère que son suivi était très variable selon les classes. Une comparaison avec des protocoles de recherche similaires au nôtre conduit à s'interroger sur la formation et l'accompagnement proposés aux enseignants. La formation proposée était peut-être trop courte et l'accompagnement trop limité pour favoriser l'appropriation du logiciel en tant qu'outil pédagogique par les enseignants. C'est un problème partagé par de nombreuses expérimentations écologiques, qui peinent à reproduire les effets constatés en laboratoire.

## 9.2 Proposition d'ajustements à envisager pour de futures expérimentations

L'analyse des facteurs qui ont pu contribuer à ne pas observer les effets attendus suite à l'utilisation d'*Evasion* suggère que plusieurs modifications du logiciel lui-même et du protocole sont à envisager en vue de la nouvelle expérimentation qui sera mise en oeuvre dans l'académie de Mayotte durant l'année scolaire 2018–2019. Ces ajustements permettront, nous l'espérons, d'entraîner plus efficacement les dimensions de l'attention visuelle impliquées en lecture et d'améliorer la qualité du suivi du protocole et ainsi de récupérer des données moins bruitées sur l'impact d'*Evasion*.

## 9.2.1 Modifier le logiciel pour accroître son efficacité

### 9.2.1.1 Renforcement de la difficulté des mini-jeux

Le valeur relativement élevée du niveau  $K$  des élèves estimée en début d'entraînement, son faible coefficient d'accroissement au cours du temps et la proportion d'élèves ayant un taux de réussite supérieur à 80% nous amènent à penser que nos mini-jeux étaient trop faciles pour entraîner convenablement les capacités attentionnelles des élèves. La répartition homogène du taux de réussite le long de l'espace de difficulté laisse penser que les dimension de difficulté proposées sont spécifiées convenablement, et que l'algorithme Parseval fonctionne correctement.

En revanche, il faut nettement renforcer la difficulté de nos exercices de manière à ce que les tâches imposent aux joueurs d'avoir une quantité d'attention et une capacité à les répartir largement dans l'espace suffisamment importantes pour réussir l'entraînement. Les modifications que nous proposons ici concernent à la fois les dimensions contenues dans notre espace de difficulté, et certains paramètres de nos tâches qui ne sont pas contrôlés par Parseval.

#### **Augmenter la quantité de ressources attentionnelles pour identifier les stimuli**

Toutes nos tâches impliquent l'identification de stimuli visuels. Augmenter la quantité de ressources attentionnelles nécessaires pour les identifier avec précision devrait renforcer la difficulté de l'entraînement et, par là-même, son efficacité. La version d'Evasion qui a été mise en œuvre dans les classes de CP cette année utilisait comme stimuli des séquences familières de lettres (bigrammes et trigrammes existants), ce qui, selon le modèle BRAID, faciliterait leur reconnaissance (Phénix, 2018). En effet, l'identification de séquences de lettres est notamment facilitée par l'activation des mots qui les contiennent en mémoire lexicale. Lors de l'identification d'un stimulus, ces activations facilitatrices limitent la mobilisation de l'attention visuelle que nous souhaitons entraîner.

Une piste d'accroissement de la difficulté des épreuves consisterait donc à remplacer nos stimuli par des séquences non familières, comme des séquences de consonnes (par exemple, « NRTS ») ou des séquences mêlant consonnes et chiffres (par exemple, « F4HR »), générées aléatoirement. Les séquences elles-mêmes pourraient être plus longues que dans la version originelle d'Evasion, ce qui là encore augmenterait la quantité de ressources attentionnelles nécessaire au traitement. Proposer des séquences de longueur 2 à 6 caractères correspondrait au nombre moyen de lettres correctement identifiées en CP et en CM2 respectivement lors des tâches de report (Bosse & Valdois, 2009). La longueur maximale est sans doute excessive, dans la mesure où les séquences ne sont pas présentées isolément ; il s'agit cependant d'une borne maximale qui a peu de chance d'être atteinte, puisqu'elle sera adaptée aux performances des élèves par Parseval.

Une dernière piste pour augmenter la quantité de ressources attentionnelles nécessaire à l'identification du stimulus est de renforcer la similarité visuelle entre les cibles et les distracteurs. En effet, si les différences sont minimales, l'élève aura besoin d'analyser rapidement et finement la totalité de la chaîne pour trouver l'endroit qui porte cette différence. Pour augmenter la similarité entre cible et distracteurs, nous avons accentué la présence des transpositions (initialement limitées au dernier cran de difficulté), car ce sont les erreurs les plus difficiles à détecter (Marinus, Kezilas, Kohnen, Robidoux, & Castles, 2018).

**Renforcer l'incertitude spatiale et temporelle** Un autre moyen d'augmenter l'efficacité de notre entraînement serait de renforcer l'imprévisibilité des mini-jeux. Pour rappel,

l'incertitude spatiale est une propriété des jeux vidéo d'action, qui force le joueur à répartir son attention sur une zone large pour détecter les événements à venir. Dans les mini-jeux d'Evasion, une séquence cible est à rechercher au cours de chaque phase d'entraînement parmi des distracteurs.

Or, nous n'avons initialement associé, par cran de difficulté, qu'un seul distracteur pour un stimulus-cible. Ce choix pourrait faciliter la résolution de nos tâches : l'élève peut se contenter de diriger son attention vers les zones de la séquence qui portent les différences à observer, et n'a donc besoin que de peu de ressources attentionnelles à mobiliser dans une zone restreinte. Là encore, cela pourrait compromettre un entraînement efficace des dimensions de l'attention visuelle impliquées en lecture. Dans de futures versions d'Evasion, il conviendrait de proposer plusieurs distracteurs par cran de difficulté pour un même stimulus-cible et des distracteurs différents pourraient être proposés au sein d'une même vague.

Pris tous ensemble, ces points augmenteraient l'incertitude spatiale des événements à traiter. Une autre manière de renforcer l'incertitude spatiale est d'effectuer un tirage aléatoire pour modifier la valeur de paramètres qui ne variaient pas dans la première version du logiciel. Par exemple, il est possible de faire varier le nombre de bonnes portes par étage dans la Tour des Lettres.

**Élargir la zone de mobilisation des ressources attentionnelles** Une première manière de forcer les élèves à répartir plus largement leur attention sur la scène visuelle serait d'augmenter encore la surface qu'occupent les événements d'intérêt. Cela correspond au critère des jeux vidéo d'action d'alternance du niveau d'analyse de la scène visuelle. Si les événements ont lieu sur une large zone et qu'ils sont imprévisibles, le joueur doit répartir son attention pour les détecter, puis il doit concentrer ses ressources à l'emplacement de l'événement détecté. Il est possible d'augmenter la zone couverte par nos événements dans deux mini-jeux : l'Attrape-Lettre et la Forêt en T. Dans l'Attrape-Lettre, il est possible d'ajouter des couloirs supplémentaires que suivraient les pages. Dans la Forêt en T, la surface qu'occupe les fantômes pourrait être étendue à la totalité de l'écran.

**Diminuer le temps imparti pour traiter la séquence** Diminuer le temps disponible pour analyser les items d'Evasion force le joueur à accumuler le plus rapidement possible des informations sur la totalité de la séquence, et donc à traiter celle-ci en parallèle. Plusieurs leviers sont à notre disposition dans chaque mini-jeu. Dans la version utilisée de la Tour des Lettres, il est probable que le succès d'un événement dépende de la position initiale du regard du joueur sur l'écran. Si celui-ci est proche de la bonne porte, il la détecte plus rapidement et il peut alors utiliser le temps imparti pour procéder à une analyse sérielle de la séquence de lettres au dessus de la porte. Une façon de forcer un traitement parallèle de cette séquence serait d'augmenter le nombre de portes correspondant à la cible par étage de sorte que, même si le joueur trouve rapidement une porte correcte, il ne puisse pas consacrer trop de temps à son analyse.

Dans la Forêt en T, nous pourrions réduire la durée pendant laquelle un couple de fantômes se tient la main et augmenter leur vitesse de déplacement : le joueur aurait peu de temps pour détecter le couple ainsi formé puis décider si oui ou non la séquence qu'ils portent correspond à la cible. De manière similaire, nous pourrions augmenter respectivement la vitesse de déplacement des œufs et des pages dans l'Omelette et l'Attrape-Lettre.

### 9.2.1.2 Amélioration de l'engagement des élèves dans les mini-jeux

Nous avons remarqué précédemment que le protocole n'avait pas été suivi avec la même rigueur par toutes les classes. La durée totale des entraînements individuels, la durée des sessions d'entraînement quotidiennes et leur maintien dans le temps étaient extrêmement variables et largement insuffisants pour une dizaine de classe. Une analyse supplémentaire du questionnaire menée dans le projet Fluence révèle qu'une dizaine d'enseignants pointent la faible « durée de vie » des mini-jeux. Si les élèves étaient, selon eux, particulièrement enthousiastes initialement de jouer à *Evasion*, après quelques semaines, leur motivation avait sensiblement diminuée. Bien que la semaine de démotivation perçue ne semble pas avoir d'impact statistique, selon nos mesures et analyses, sur l'évolution de l'attention visuelle avant et après entraînement, ce facteur peut compromettre le suivi du protocole. Plusieurs enseignants nous ont dit avoir besoin de « relancer » et « d'encourager » les élèves à jouer, dont certains « rechignaient ». Il est possible que ces réactions négatives limitent le suivi de protocole par les enseignants.

Nous avons initialement proposé aux enseignants d'utiliser un poster, pour améliorer l'engagement des élèves. Celui-ci était composé d'autocollants que les élèves collaient en fin de séance et était rempli au bout des 10 semaines d'expérience. Il ne semble pas avoir rempli son rôle puisque plusieurs enseignants nous rapportent ne pas l'avoir utilisé, son utilisation ayant été jugée trop fastidieuse.

De plus, nous sommes revenus sur notre volonté de ne pas intégrer de feedback indiquant le niveau de performance de chaque élève. Nous craignons initialement que ces informations puissent permettre la comparaison entre élèves, au détriment des plus faibles. Ainsi, le seul feedback dans *Evasion* était l'animation clôturant chaque mini-jeu, dont le visuel changeait en fonction du progrès de l'élève par rapport à son niveau estimé. Or plusieurs études montrent que l'introduction de récompenses au sein d'un entraînement favorise l'engagement des participants (Deci, Ryan, & Koestner, 1999).

Il serait donc peut-être pertinent d'ajouter aux mini-jeux d'*Evasion* des récompenses plus saillantes. Des feedbacks différents viendraient récompenser l'engagement des joueurs (taux de réussite égal ou supérieur à la consigne de Parseval), leur niveau de performance absolu (niveau  $K$  estimé) et le progrès de leur niveau de performance ( $\frac{dK}{dt} > seuil$ ). Une histoire plus présente, avec des missions à accomplir, et des scènes à débloquent pourrait augmenter la durée de vie de nos mini-jeux.

## 9.2.2 Protocole

La principale limitation de notre étude est la durée d'entraînement réelle des élèves, très inférieure à la durée recommandée. Pour pallier ce problème, nous proposons trois leviers : augmenter la durée prescrite d'entraînement, renforcer la formation des enseignants et améliorer leur accompagnement.

Concernant le premier point, l'idéal serait de rajouter quelques semaines d'entraînement, au même régime de trois séances hebdomadaires de 20 minutes. Augmenter la durée d'entraînement prescrite et le nombre de semaines d'entraînement pourrait permettre, même si le suivi est imparfait, à la majorité des élèves d'atteindre les 7 h 30 d'entraînement qui avaient permis à MAEVA d'avoir un effet sur l'empan visuo-attentionnel (Zoubrinetzky, 2015). Grâce à une analyse de survie menée sur nos données, telle que décrite à la Section 8.1.3, nous pourrions probablement estimer la valeur d'entraînement qui a la plus grande probabilité d'induire une amélioration de l'empan visuo-attentionnel dont nous aurions défini l'ampleur. Nous ne savons pas si les données actuelles permettent de mener une telle ana-

lyse : il faut qu'elles aient suffisamment de variabilité au niveau des temps d'entraînement, et suffisamment d'observations associées à chaque durée d'entraînement pour proposer une estimation fiable. En l'état, il est aussi possible que les durées d'entraînement contenues dans nos données soient trop faibles. C'est un point qui fera l'objet d'analyses ultérieures dans le projet Fluence.

Cependant, nos expériences ayant lieu en classe, nous sommes de fait limités par le temps de classe disponible. Nous sommes actuellement en discussion avec le vice-rectorat de Mayotte pour voir s'il est envisageable de rallonger la durée de notre protocole. Il serait intéressant d'avoir une durée d'entraînement équivalente à celle de Pasqualotto et al. (2018) et Franceschini et al. (2012), ce qui permettrait de comparer l'amélioration des performances en lecture induits par leurs entraînements et le nôtre (mais pas en terme de performances visuo-attentionnelles, étant donné la différence des tâches utilisées pour les mesurer).

Concernant la formation et l'accompagnement des enseignants, nous avons vu précédemment qu'ils semblaient trop faibles pour permettre le bon suivi du protocole par les enseignants. Nous aimerions pouvoir mettre en place et animer des groupes de travail avec les enseignants. Ces groupes se réuniraient pendant plusieurs jours avant le démarrage du projet, puis mensuellement lors du protocole. Lors de la formation initiale, les logiciels seraient présentés et utilisés par les enseignants. Bien que nos logiciels puissent être utilisés en autonomie par les élèves, une séquence pédagogique dans laquelle s'insèrent les entraînements sur tablette pourrait être préparée à ce moment-là. Les enseignants du premier volet d'expérimentation à Grenoble du projet seraient invités à venir partager leurs bonnes pratiques. Par la suite, nous pourrions organiser trois réunions dans chaque établissement participant au projet : l'une à la fin de la première semaine d'expérimentation, une autre à mi-parcours et une dernière en fin de protocole. Ces moments d'échanges nous permettraient de détecter les difficultés que peuvent rencontrer les enseignants et essayer d'y apporter rapidement une solution. Nous avons conscience que ces propositions sont difficilement compatibles avec la réalité du terrain, et nous y reviendrons dans la Section 9.3.

Pour améliorer la mise en place de l'expérience et le support des enseignants, nous aurions besoin de personnels dédiés dans la région où auront lieu l'expérimentation. Idéalement doté d'une formation à la méthodologie expérimentale et connaissant les enjeux propres au terrain, ces coordinateurs pourraient mettre en place des groupes de travail avec les enseignants et assurer un suivi régulier directement dans les établissements scolaires. Ce soutien en présentiel semble important, comme le suggère l'étude de Fairweather et al. (1974).

Enfin, l'interface web proposée aux enseignants pour suivre l'entraînement des élèves a souffert de défauts de conception (difficulté à se connecter, actualisation différée des données des élèves) qui ont compromis son utilisation. Cette faible utilisation peut expliquer la qualité insuffisante du suivi de protocole : n'utilisant pas les indicateurs de durée d'entraînement fournis par l'interface, les enseignants planifiaient et menaient les entraînements en fonction de leurs propres impressions. Il nous faudrait trouver une nouvelle manière de donner aux enseignants les informations nécessaires sans qu'ils aient à effectuer trop de manipulations. Une solution serait d'afficher le temps de jeu de l'élève directement sur l'écran d'accueil de l'application : en passant dans les rangs en début de séance, l'enseignant pourrait ainsi savoir où en est chaque élève.

## 9.3 Vers des expérimentations écologiques standardisées soutenues par des instances dédiées

Avoir réalisé l'intégralité d'une expérimentation pédagogique à grande échelle et avoir passé en revue une partie de la littérature sur le sujet nous montre les limitations actuelles de tels projets de recherche. Nous proposons ici humblement des amorces de solutions pour améliorer la qualité des connaissances ainsi produites. Ces solutions sont d'abord scientifiques, car les connaissances sur la conduite de ces projets ont actuellement un faible niveau de preuve. Cependant, ces solutions sont aussi organisationnelles, du fait des besoins particuliers de ce type d'expérimentations qui peuvent compromettre sa qualité scientifique.

### 9.3.1 Un nouveau champ de recherche à développer

Parmi les études citées au Chapitre 8, rares sont celles qui arrivent à reproduire à grande échelle les effets qui ont été montrés sur des échantillons plus petits et plus contrôlés. Ces échecs successifs sont d'autant plus douloureux que les mêmes erreurs (mise en place précipitée des dispositifs sur le terrain, manque de formation et d'accompagnement des enseignants, etc.) semblent se reproduire indéfiniment.

Cette série, trop rarement interrompue, trouve peut-être son origine dans le fait que ce type d'expérience reste encore marginal. En effet, les données ainsi collectées sont bien plus bruitées que celle obtenues dans l'environnement contrôlé d'un laboratoire. Les études publiées sont trop peu nombreuses pour assurer une diffusion efficace des risques et des solutions que les chercheurs peuvent apporter à ces derniers. Mais plus que le problème de la quantité, le frein à la diffusion de ces informations est le cloisonnement disciplinaire. Pour interpréter les résultats de cette thèse, nous avons dû faire appel à des travaux menés en science de l'éducation, en économie expérimentale et en gestion des politiques publiques (sanitaires, en particulier). Les collaborations entre ces domaines de recherche restent malheureusement rares, étant donnée la différence du périmètre de nos objets d'étude, et, d'un point de vue pragmatique, la différence de journaux scientifiques dans lesquels nous publions nos travaux. Les ouvrages qui synthétisent les résultats issus de ces différents domaines tels que ceux de Fixsen et al. (2005) et Kelly et Perkins (2012) sont rares et méritent d'être salués.

Ces domaines ont pourtant des cadres théoriques qu'il serait intéressant de croiser avec ceux de la psychologie expérimentale pour améliorer les protocoles de recherche écologique. Parmi les trois pistes d'amélioration que nous avons listées au chapitre 8, revenons par exemple sur l'adhésion des enseignants au projet avant le démarrage de celui-ci. Un projet de recherche en psychologie sociale serait tout indiqué pour construire et valider une échelle d'adhésion aux protocoles de recherche écologiques. En effet, les attitudes et leurs variations au sein de groupes sociaux particuliers sont largement étudiés par les chercheurs de ce domaine. Plusieurs études portent même sur le changement d'attitude, c'est-à-dire la manière dont un sujet fait évoluer ses attitudes en fonction des informations qu'il reçoit (Petty, Briñl, Tormala, Blair, & Jarvis, 2006). Ce projet permettrait de connaître en amont les besoins des intervenants en terme d'accompagnement et de les sensibiliser plus efficacement aux enjeux d'une expérimentation écologique.

De tels projets de recherche, ainsi que d'autres menés sur la formation et l'accompagnement des intervenants nous permettraient d'obtenir des standards méthodologiques qui, s'ils sont respectés, devraient augmenter le niveau de fiabilité des résultats d'une expérience écologique. Ces standards expérimentaux seront nécessairement sensibles aux contextes dans lesquels auront lieu chaque expérimentation écologique. En plus de tester l'efficacité d'un

dispositif particulier comparativement à un autre, il convient donc de comparer différentes implémentations d'un même dispositif.

Un projet de recherche menée par Marie-Line Bosse (LPNC), une chercheuse du projet Fluence, en collaboration avec Maryse Bianco (Laboratoire de Recherche sur les Apprentissages en Contexte, EA602), s'intéresse justement à cette question et comparera la mise en place d'une même méthode d'apprentissage de la lecture par des enseignants qui auront été accompagnés différemment. L'une des conditions poussera l'accompagnement jusqu'à la conception de la séquence pédagogique complète dans laquelle s'intégrera cette méthode, et la condition contrôle sera l'introduction des outils en classe sans formation ni accompagnement. Ces différentes implémentations peuvent avoir des effets variables dans les classes participant au projet. Les modèles multi-niveaux sont des outils tout indiqués pour estimer cette variabilité et éventuellement l'expliquer en fonction de caractéristiques contextuelles (niveau scolaire de la classe, niveau socio-professionnel, ruralité, niveau d'équipements pédagogiques, etc.).

### 9.3.2 Retour d'expérience sur les modalités pratiques du projet

Les pistes d'amélioration des protocoles de recherche écologiques ne se limitent pas au seul cadre scientifique. Du fait de leur ampleur et de leur complexité, ces projets ont besoin d'un accompagnement particulier auxquels les structures existantes (CNRS, universités) ne sont pas préparées. En tant que chercheurs, nous avons besoin que de nouvelles procédures ou institutions soient créées pour nous accompagner au mieux.

A titre d'exemple, le projet Fluence a été financé sur 4 ans à hauteur de 1.5M€ et a mobilisé 50 enseignants, des dizaines de vacataires chaque année, 10 chercheurs de trois laboratoires différents, ainsi que quatre prestataires industriels. Par rapport à d'autres expérimentations écologiques citées au Chapitre 8, l'expérimentation du projet Fluence pourrait néanmoins être qualifiée de modeste, car elle n'implique « que » 730 élèves de CP (auxquels il faut ajouter 700 élèves de CP à Mayotte et 390 élèves de 6ème sur l'académie de Grenoble). En raison du nombre et de la diversité des acteurs impliqués, de nombreux écueils ont menacé le bon déroulement du projet. Même s'ils semblent hors du périmètre du travail de recherche proprement dit, ces différents points doivent être soulevés, étant donné leur impact sur la qualité de celui-ci. Nous précisons qu'ils ne sont pas dus à une mauvaise application des procédures normales, mais au manque de compatibilité entre les procédures existantes et les contraintes auxquelles nous avons fait face.

La déroulement du projet Fluence suit naturellement celui du calendrier scolaire : les écoles fermant plusieurs semaines par an à cause des congés scolaires, nous avons dû fixer les expérimentations en fonction de ceux-ci. Les retards étaient donc difficilement acceptables : un délai de quelques semaines dans la livraison d'une application, ce qui est courant dans le développement d'un logiciel, décale le démarrage des entraînements puis des post-tests qui étaient dans notre cas proches des grandes vacances. La réactivité des individus impliqués dans le projet, et notamment celle de notre prestataire industriel, a permis d'éviter ce retard. De même, des imprévus peuvent nécessiter le rallongement de notre financement de quelques milliers d'euros, qui, s'ils ne sont pas débloqués rapidement, peuvent compromettre le déroulement du projet (dont le coût total est quand même de l'ordre du million d'euros) et la qualité des données obtenues sur des centaines d'enfants. Les projets écologiques ont donc besoin d'un niveau de réactivité et de flexibilité supérieur à celui des structures qui portent traditionnellement nos financements de recherche (CNRS, université, etc.).

Par ailleurs, les ressources logistiques et humaines des académies, dimensionnées pour

couvrir leur fonctionnement normal, sont insuffisantes pour un projet d'expérimentation à grande échelle. Par exemple, nous avons dû adapter la durée de la formation des enseignants participant au projet en fonction du nombre de remplaçants présents sur l'académie. Beaucoup d'actions que le personnel du rectorat n'était pas en mesure d'effectuer pour des questions de responsabilité ont été réalisées par les équipes de recherche elles-mêmes (apprentissage des procédures de contractualisation avec Apple, paramétrage du système de déploiement d'application à distance Airwatch) alors qu'elles ne relèvent pas selon toute évidence de leur compétence. Du fait du niveau de responsabilité de chacun (et donc pragmatiquement, des droits d'accès aux données des différentes entités partenaires du projet), il ne nous était pas possible de prévoir du personnel supplémentaire pour assurer ces différentes tâches. Même si nous avons pu compter à plusieurs reprises sur le soutien du réseau Canopé, nous pensons que les académies devraient être dotées de ressources humaines supplémentaires dédiées à la mise en place d'expérimentations dans les écoles.

Ce retour d'expérience souligne le besoin d'un accompagnement spécifique au financement, à la budgétisation et à la mise en place des expériences écologiques. En ce sens, nous pouvons nous inspirer de deux structures publiques créées respectivement par le gouvernement américain et britannique : l'Institute of Education Science, déjà cité dans ce travail, et l'Education Endowment Foundation. Ces organismes financent des projets de recherche et publient régulièrement des appels à projets sur des thématiques prédéfinies, auxquels chercheurs et enseignants peuvent postuler. Ils se chargent aussi de la diffusion des résultats obtenus, en rédigeant des synthèses vulgarisées à destination des enseignants et en mettant à disposition de ces derniers des ressources pédagogiques à utiliser directement en classe. Ces instances ont leurs propres procédures qui correspondent aux besoins des projets de recherche écologiques en terme de réactivité et de flexibilité.

Ces structures permettraient aussi de structurer le dialogue entre chercheurs et enseignants. Ce point est essentiel car les projets d'expérimentations écologiques reposent en partie sur l'interaction entre ces deux publics. Or, à l'heure actuelle, ces publics se côtoient trop peu et trop souvent de manière informelle (Bressoux, 2017). Cette méconnaissance réciproque est en partie responsable des conséquences fâcheuses que nous avons décrites au Chapitre 8. Augmenter la quantité et la qualité de telles interactions permettrait d'une part aux chercheurs de mieux dimensionner leur projet de recherche aux besoins du terrain, et d'autre part aux enseignants de prendre une place plus centrale dans la préparation des expérimentations. L'Institut Carnot de l'Éducation, créé en 2016, a amorcé des actions en ce sens : après la publication d'un appel à manifestation d'intérêt diffusé auprès des enseignants et des chercheurs, 20 projets de recherches ont été sélectionnés et sont accompagnés par l'Institut, autour de la valorisation de leurs résultats. Par ailleurs, la mise en place de communautés formalisées permettrait aussi de former les jeunes chercheurs qui n'ont jamais mené d'expériences en classe et de sensibiliser les enseignants aux pratiques pédagogiques fondées sur les preuves. Pour ce faire, nous pensons qu'il est important de sortir du seul cadre français, comme en atteste nos échanges avec l'équipe italienne qui a développé le jeu Skies of Manawak (Université de Trente).

En France, un Conseil Scientifique de l'Éducation Nationale a été créé en janvier 2018. Il serait, en collaboration avec le réseau Canopé, tout indiqué pour coordonner une instance d'accompagnement de recherches écologiques et de diffusion des pratiques pédagogiques fondées sur les preuves. Une première initiative lancée en octobre 2018, la Fabrique des Ateliers Académiques<sup>1</sup>, qui a pour ambition de relier les apports de la recherche et l'expertise de

---

1. <http://www.education.gouv.fr/cid135480/lancement-de-la-fabrique-des-ateliers-academiques-recherche-pratiques-formations-ressources.html>

terrain au sein de chaque académie, semble aller dans ce sens. Il ne reste plus qu'à espérer que les actions menées ces prochaines années amorcent la résolution des problèmes constatés sur le terrain, problèmes dont la solution est finalement à portée de main.



# Bibliographie

- Aarons, G. A. (2004). Mental Health Provider Attitudes Toward Adoption of Evidence-Based Practice : The Evidence-Based Practice Attitude Scale (EBPAS). *Mental Health Services Research*, 6(2), 61–74.
- Aarons, G. A., Glisson, C., Hoagwood, K., Landsverk, J., & Cafri, G. (2010). Psychometric properties and United States national norms of the Evidence-Based Practice Attitude Scale (EBPAS). *Psychological Assessment*, 22, 356–365.
- Abrams, R. A., Davoli, C. C., Du, F., Knapp, W. H., & Paull, D. (2008). Altered vision near the hands. *Cognition*, 107(3), 1035–1047. doi: 10.1016/j.cognition.2007.09.006
- Adam, J. J., Bovend'Eerdt, T. J., van Dooren, F. E., Fischer, M. H., & Pratt, J. (2012). The closer the better : Hand proximity dynamically affects letter recognition accuracy. *Attention, Perception, and Psychophysics*, 74(7), 1533–1538. doi: 10.3758/s13414-012-0339-3
- Adam, J. J., Taminiou, B., van Veen, N., Ament, B., Rijcken, J. M., Meijer, K., & Pratt, J. (2008). Planning Keypress and Reaching Responses : Effects of Response Location and Number of Potential Effectors. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 34(6), 1464–1478. doi: 10.1037/a0011975
- Aghababian, V., & Nazir, T. A. (2000). Developing normal reading skills : aspects of the visual processes underlying word recognition. *Journal of experimental child psychology*, 76(2), 123–150.
- Ahissar, M., & Hochstein, S. (1997). Task difficulty and the specificity of perceptual learning. *Nature*, 387(6631), 401–406. doi: 10.1038/387401a0
- Andreu, S., Dalibard, E., & Etève, Y. (2016). *Note d'Information n°20 : CEDRE 2003-2009-2015 - Maîtrise de la langue en fin d'école : l'écart se creuse entre filles et garçons* (Rapport technique). Direction de l'évaluation, de la prospective et de la performance.
- Ans, B., Carbonnel, S., & Valdois, S. (1998). A connectionist multiple-trace memory model for polysyllabic word reading. *Psychological review*, 105(4), 678–723. doi: 10.1037/0033-295X.105.4.678-723
- Antzaka, A., Lallier, M., Meyer, S., Diard, J., Carreiras, M., & Valdois, S. (2017). Enhancing reading performance through action video games : The role of visual attention span. *Scientific Reports*, 7(1), 1–10. doi: 10.1038/s41598-017-15119-9
- Antzaka, A., Martin, C., Caffarra, S., Schlöffel, S., Carreiras, M., & Lallier, M. (2018). The effect of orthographic depth on letter string processing : The case of visual attention span and rapid automatized naming. Reading and Writing,. *Reading and Writing : An Interdisciplinary Journal*, 31(5), 583–605.
- Appelbaum, L. G., Cain, M. S., Darling, E. F., & Mitroff, S. R. (2013). Action video game playing is associated with improved visual sensitivity, but not alterations in visual sensory memory. *Attention, Perception, and Psychophysics*, 75(6), 1161–1167. doi: 10.3758/s13414-013-0472-7
- Arnold, G., & Auvray, M. (2018). Tactile recognition of visual stimuli : Specificity versus

- generalization of perceptual learning. *Vision Research*(November). doi: 10.1016/j.visres.2017.11.007
- Auclair, L., & Siéoff, E. (2002). Attentional cueing effect in the identification of words and pseudowords of different length. *Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A : Human Experimental Psychology*, 55(2), 445–463. doi: 10.1080/02724980143000415
- Awadh, F., Phénix, T., Antzaka, A., Lallier, M., Carreiras, M., & Valdois, S. (2016). Cross-language modulation of visual attention span : An Arabic-French-Spanish comparison in skilled adult readers. *Frontiers in Psychology*, 7. doi: 10.3389/fpsyg.2016.00307
- Awh, E., Serences, J., Laurey, P., Dhaliwal, H., van der Jagt, T., & Dassonville, P. (2004). Evidence against a central bottleneck during the attentional blink : Multiple channels for configural and featural processing. *Cognitive Psychology*, 48(1), 95–126. doi: 10.1016/S0010-0285(03)00116-6
- Azizi, E., Abel, L. A., & Stainer, M. J. (2016). The influence of action video game playing on eye movement behaviour during visual search in abstract, in-game and natural scenes. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 484–497. doi: 10.3758/s13414-016-1256-7
- Baldassi, S., & Verghese, P. (2005). Attention to locations and features : Different top-down modulation of detector weights. *Journal of Vision*, 5(6), 7–7. doi: 10.1167/5.6.7
- Ball, K., Beard, B. L., Roenker, D. L., Miller, R. L., & Griggs, D. S. (1988). Age and visual search : expanding the useful field of view. *Journal of the Optical Society of America A*, 5(12), 2210. doi: 10.1364/JOSAA.5.002210
- Ball, K., Berch, D. B., Helmers, K. F., Jobe, J. B., Leveck, M. D., Marsiske, M., . . . Willis, S. L. (2002). Effects of Cognitive Training Interventions With Older Adults. *Journal of the American Medical Association*, 288(18), 2271–2281.
- Baron, J., & Thurston, I. (1973). An analysis of the word-superiority effect. *British Journal of Psychology*, 4, 207–228. doi: 10.1111/j.2044-8295.1988.tb02272.x
- Bauer, K. N., Brusso, R. C., & Orvis, K. A. (2012). Using Adaptive Difficulty to Optimize Videogame-Based Training Performance : The Moderating Role of Personality. *Military Psychology*, 24(2), 148–165. doi: 10.1080/08995605.2012.672908
- Bavelier, D., Achtman, R. L., Mani, M., & Föcker, J. (2012). Neural bases of selective attention in action video game players. *Vision Research*, 61, 132–143. doi: 10.1016/j.visres.2011.08.007
- Bavelier, D., Green, C. S., & Seidenberg, M. S. (2013). Cognitive development : Gaming your way out of dyslexia? *Current Biology*, 23(7), R282–R283. doi: 10.1016/j.cub.2013.02.051
- Beck, D. M., & Kastner, S. (2009). Top-down and bottom-up mechanisms in biasing competition in the human brain. *Vision Research*, 49(10), 1154–1165. doi: 10.1016/j.visres.2008.07.012
- Beck, M. R., Goldstein, R. R., van Lamsweerde, A. E., & Ericson, J. M. (2018). Attending globally or locally : Incidental learning of optimal visual attention allocation. *Journal of Experimental Psychology : Learning Memory and Cognition*, 44(3), 387–398. doi: 10.1037/xlm0000428
- Bediou, B., Adams, D. M., Mayer, R. E., Tipton, E., Green, C. S., & Bavelier, D. (2017). Meta-analysis of Action Video Game Impact on Perceptual, Attentional, and Cognitive Skills. *Psychological Bulletin*, 144(1), 77–110. doi: 10.1037/bul0000130
- Besner, D., Risko, E. F., Stolz, J. A., White, D., Reynolds, M., O'Malley, S., & Robidoux, S. (2016). Varieties of Attention : Their Roles in Visual Word Identification. *Current Directions in Psychological Science*, 25(3), 162–168. doi: 10.1177/0963721416639351

- Besner, D., Risko, F., & Sklair, N. (2005). Spatial attention as a necessary preliminary to early processes in reading. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*, *59*(2), 99–108.
- Bianco, M. (2016). *Conférence de Consensus : Lire, comprendre, apprendre - Comment soutenir le développement des compétences en lecture ?* (Rapport technique). CNESCO.
- Bichot, N. P., Rossi, A. F., & Desimone, R. (2005). Parallel and serial neural mechanisms for visual search in macaque area V4. *Science*, *308*(5721), 529–534. doi: 10.1126/science.1109676
- Boles, D. B., & Clifford, J. E. (1989). An upper- and lowercase alphabetic similarity matrix, with derived generation similarity values. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, *21*(6), 579–586. doi: 10.3758/BF03210580
- Bonher, G., & Dickel, N. (2011). Attitudes and attitude change. *Annual Review of Psychology*(62), 391–417. doi: 10.4324/9780203838068
- Boot, W. R., Kramer, A. F., Simons, D. J., Fabiani, M., & Gratton, G. (2008). The effects of video game playing on attention, memory, and executive control. *Acta Psychologica*, *129*(3), 387–398. doi: 10.1016/j.actpsy.2008.09.005
- Borji, A., & Itti, L. (2013). State-of-the-art in visual attention modeling. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, *35*(1), 185–207. doi: 10.1109/TPAMI.2012.89
- 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*(141), 158.
- Bosse, M. L., Tainturier, M. J., & Valdois, S. (2007). Developmental dyslexia : The visual attention span deficit hypothesis. *Cognition*, *104*(2), 198–230. doi: 10.1016/j.cognition.2006.05.009
- Bosse, M. L., & Valdois, S. (2009). Influence of the visual attention span on child reading performance : A cross-sectional study. *Journal of Research in Reading*, *32*(2), 230–253. doi: 10.1111/j.1467-9817.2008.01387.x
- Bowey, J. A. (1995). Socioeconomic status differences in preschool phonological sensitivity and first-grade reading achievement. *Journal of Educational Psychology*, *87*(3), 476–487. doi: 10.1037/0022-0663.87.3.476
- Bressoux, P. (2017). Practice-based research : une aporie et des espoirs. *Education & didactique*, *11*(3), 123–134.
- Bressoux, P., & Bianco, M. (2004). Long-term teacher effects on pupils' learning gains. *Oxford Review of Education*, *30*(3), 327–345. doi: 10.1080/0305498042000260476
- Buckley, D., Codina, C., Bhardwaj, P., & Pascalis, O. (2010). Action video game players and deaf observers have larger Goldmann visual fields. *Vision Research*, *50*(5), 548–556. doi: 10.1016/j.visres.2009.11.018
- Bundesen, C., Habekost, T., & Kyllingsbæk, S. (2005). A neural theory of visual attention : Bridging cognition and neurophysiology. *Psychological Review*, *112*(2), 291–328. doi: 10.1037/0033-295X.112.2.291
- Bus, A. G., & Van Ijzendoorn, M. H. (1999). Phonological awareness and early reading : A meta-analysis of experimental training studies. *Journal of Educational Psychology*, *91*(3), 403–414. doi: 10.1037/0022-0663.91.3.403
- Cain, M. S., Landau, A. N., & Shimamura, A. P. (2012). Action video game experience reduces the cost of switching tasks. *Attention, Perception, and Psychophysics*, *74*(4), 641–647. doi: 10.3758/s13414-012-0284-1
- Carrasco, M. (2011). Visual attention : The past 25 years. *Vision Research*, *51*(13), 1484–

1525. doi: 10.1016/j.visres.2011.04.012
- Carrasco, M., Giordano, A. M., & McElree, B. (2004). Temporal performance fields : Visual and attentional factors. *Vision Research*, *44*(12), 1351–1365. doi: 10.1016/j.visres.2003.11.026
- Carrasco, M., & McElree, B. (2001). Covert attention accelerates the rate of visual information processing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *98*(9), 5363–5367. doi: 10.1073/pnas.081074098
- Carrasco, M., & Yeshurun, Y. (1998). The contribution of covert attention to the set-size and eccentricity effects in visual search. *Journal of Experimental Psychology*, *24*(2), 673–692.
- Castel, A. D., Pratt, J., & Drummond, E. (2005). The effects of action video game experience on the time course of inhibition of return and the efficiency of visual search. *Acta Psychologica*, *119*(2), 217–230. doi: 10.1016/j.actpsy.2005.02.004
- Castiello, U., & Umiltá, C. (1990). Size of the Attentional focus and efficiency of processing. *Acta Psychologica*, *73*, 195–209.
- Castles, A., & Coltheart, M. (1993). Varieties of developmental dyslexia. *Cognition*, *47*, 149–180.
- Castles, A., & Coltheart, M. (2004). Is there a causal link from phonological awareness to success in learning to read? *Cognition*, *91*(1), 77–111. doi: 10.1016/S0010-0277(03)00164-1
- Cave, K. R., & Bichot, N. P. (1999). Visuospatial attention : Beyond a spotlight model. *Psychonomic Bulletin & Review*, *6*(2), 204–223.
- Chabanon, L., Rivièrè, J., De la Haye, F., & Gombert, J. (2017). *Journée Défense et Citoyenneté 2017 : plus d'un jeune Français sur dix en difficulté de lecture* (Rapport technique).
- Chang, H.-H. (2015). Psychometrics Behind Computerized Adaptive Testing. *Psychometrika*, *80*(1), 1–20. doi: 10.1007/S11336-014-9401-5
- Chen, M. J. (2006). Flow in Games. *Jenovachen.Com*, *20*. doi: 10.1145/1232743.1232769
- Chica, A. B., Bartolomeo, P., & Lupiáñez, J. (2013). Two cognitive and neural systems for endogenous and exogenous spatial attention. *Behavioural Brain Research*, *237*(1), 107–123. doi: 10.1016/j.bbr.2012.09.027
- Chisholm, J. D., & Kingstone, A. (2012). Erratum to : Improved top-down control reduces oculomotor capture : The case of action video game players. *Attention, Perception, and Psychophysics*, *74*(5), 1074. doi: 10.3758/s13414-012-0298-8
- Choi, Y., Qi, F., Gordon, J., & Schweighofer, N. (2008). Performance-Based Adaptive Schedules Enhance Motor Learning. *Journal of Motor Behavior*, *40*(4), 273–280. doi: 10.3200/JMBR.40.4.273-280
- Chounta, I.-A., Albacete, P., Jordan, P., Katz, S., & McLaren, B. M. (2017). The “Grey Area” : A Computational Approach to Model the Zone of Proximal Development. *Proceedings of the 10th International Conference on Educational Data Mining*, 56–57. doi: 10.1007/978-3-319-66610-5\_1
- Clark, K., Fleck, M. S., & Mitroff, S. R. (2011). Enhanced change detection performance reveals improved strategy use in avid action video game players. *Acta Psychologica*, *136*(1), 67–72. doi: 10.1016/j.actpsy.2010.10.003
- Clement, B., Roy, D., Oudeyer, P.-Y., & Lopes, M. (2013). Multi-Armed Bandits for Intelligent Tutoring Systems. *Educational Data Mining*, *7*(2), 20–48.
- Clopper, C., & Pisoni, D. (2004). Effects of Talker Variability on Perceptual Classification of Dialect Variation. *Language and Speech*, *47*(Pt 3), 207–239.

- Colcombe, S., & Kramer, A. F. (2003). Fitness effects on the cognitive function of older adults : A Meta-Analytic Study. *Psychological Science*, *14*(2), 125–130. doi: 10.1111/1467-9280.t01-1-01430
- Colzato, L. S., van den Wildenberg, W. P., Zmigrod, S., & Hommel, B. (2013). Action video gaming and cognitive control : Playing first person shooter games is associated with improvement in working memory but not action inhibition. *Psychological Research*, *77*(2), 234–239. doi: 10.1007/s00426-012-0415-2
- Condelli, L., Cronen, S., Bos, J., Tseng, F., Altuna, J., & Ali, M. (2010). *The Impact of a reading intervention for low-literate adult ESL Learners Executive Summary* (Rapport technique). Institute of Education Science. doi: 10.2190/EC.40.1.c
- Condorcet, N. (1791). *Les Cinq mémoires sur l'instruction publique*.
- Corbetta, M., & Shulman, G. L. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, *3*(3), 201–215. doi: 10.1038/nrn755
- Csikszentmihalyi, M. (2000). Beyond Boredom and Anxiety : Experiencing Flow in Work and Play. *The Jossey-Bass Behavioral Science Series*, 231. doi: 10.2307/2065805
- Dalibard, E., Fumel, S., & Lima, L. (2016). *Note d'Information n°21 : CEDRE 2015 - Nouvelle évaluation en fin de collège : compétences langagières et littératie* (Rapport technique). Depp.
- Davoli, C. C., Brockmole, J. R., & Goujon, A. (2012). A bias to detail : How hand position modulates visual learning and visual memory. *Memory and Cognition*, *40*(3), 352–359. doi: 10.3758/s13421-011-0147-3
- Deci, E. L., Ryan, R. M., & Koestner, R. (1999). A Meta-Analytic Review of Experiments Examining the Effects of Extrinsic Rewards on Intrinsic Motivation. *Psychological Bulletin*, *125*(6), 627–668. doi: 10.1037/0033-2909.125.6.627
- Dehaene, S., Cohen, L., Sigman, M., & Vinckier, F. (2005). The neural code for written words : A proposal. *Trends in Cognitive Sciences*, *9*(7), 335–341. doi: 10.1016/j.tics.2005.05.004
- Dekker, S., Lee, N., Howard-Jones, P., & Jolles, J. (2017). Neuromyths in education : Prevalence and predictors of misconceptions among teachers and students. *Frontiers in Psychology*, *8*(APR), 1–8. doi: 10.3389/fpsyg.2017.00629
- de Kock, W. D., & Harskamp, E. G. (2014). Can teachers in primary education implement a metacognitive computer programme for word problem solving in their mathematics classes? *Educational Research and Evaluation*, *20*(3), 231–250. doi: 10.1080/13803611.2014.901921
- Démonet, J.-F., Taylor, M. J., & Chaix, Y. (2004). Developmental dyslexia. *Lancet*, *363*, 1451–1460.
- Desimone, R., & Duncan, J. (1995). Neural Mechanisms of Selective Visual Attention. *Annual Review of Neuroscience*, *18*(1), 193–222. doi: 10.1146/annurev.neuro.18.1.193
- Diard, J., Lobier, M., & Valdois, S. (2010). {Bayesian} modeling of human performance in a visual processing training software. In V. Duffy (Ed.), *Advances in applied digital human modeling* (pp. 467–476). CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Doherty, J. R., Rao, A., Mesulam, M., & Nobre, A. C. (2005). Synergistic Effect of Combined Temporal and Spatial Expectations on Visual Attention. *Journal of Neuroscience*, *25*(36), 8259–8266. doi: 10.1523/JNEUROSCI.1821-05.2005
- Downing, C. J., & Pinker, S. (1985). The spatial structure of visual attention. In (Eds.). . In M. I. Posner & O. S. Marin (Eds.), *Attention and performance (vol. xi)*. Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates, Inc.

- Drake, R., Gorman, P., & Torrey, W. C. (2002). Implementing adult “tool kits” in mental health. In *Nasmhpd conference on ebps and adult mental health, tampa, fl*.
- Dubois, M., Kyllingsbæk, S., Prado, C., Musca, S., Peiffer, E., Lassus-Sangosse, D., & Valdois, S. (2010). Fractionating the multi-character processing deficit in developmental dyslexia : Evidence from two case studies. *Cortex, 46*(6), 717–738.
- Duncan, J., & Humphreys, G. W. (1989). Visual-Search and Stimulus Similarity. *Psychological Review, 96*(3), 433–458. doi: Doi10.1037//0033-295x.96.3.433
- Dye, M. W., Green, C. S., & Bavelier, D. (2009). Increasing Speed of Processing With Action Video Games. *Curr Dir Psychol Sci, 18*(6), 321–326. doi: 10.1111/j.1467-8721.2009.01660.x
- Edwards, R. W., Jumper-Thurman, P., Plested, B. A., Oetting, E. R., Swanson, L., & Edwards, R. (2000). Community Readiness : Research To Practice. *Journal of Community Psychology, 28*(3), 291–307. doi: 10.1002/(SICI)1520-6629(200005)28:3<291::AID-JCOP5>3.0.CO;2-9
- Ehri, L. C. (2005). Learning to read words : theories, findings and issues. *Scientific Studies of Reading, 9*(2), 167–188. doi: 10.1207/s1532799xssr0902\_4
- Ehri, L. C., Nunes, S. R., Willows, D. M., Schuster, B. V., Yaghoub-Zadeh, Z., & Shanahan, T. (2001). Phonemic Awareness Instruction Helps Children Learn to Read : Evidence From the National Reading Panel’s Meta-Analysis. *Reading Research Quarterly, 36*(3), 250–287. doi: 10.1598/RRQ.36.3.2
- Engbert, R., Nuthmann, A., Richter, E. M., & Kliegl, R. (2005). Swift : A dynamical model of saccade generation during reading. *Psychological Review, 112*(4), 777–813. doi: 10.1037/0033-295X.112.4.777
- Eriksen, C. W., & St James, J. D. (1986). Visual attention within and around the field of focal attention : a zoom lens model. *Perception & psychophysics, 40*(4), 225–240. doi: 10.3758/BF03211502
- Facoetti, A., Lorusso, M. L., Paganoni, P., Cattaneo, C., Galli, R., Umiltà, C., & Mascetti, G. G. (2003). Auditory and visual automatic attention deficits in developmental dyslexia. *Cognitive Brain Research, 16*(2), 185–191. doi: 10.1016/S0926-6410(02)00270-7
- Facoetti, A., & Molteni, M. (2001). The gradient of visual attention in developmental dyslexia. *Neuropsychologia, 39*(4), 352–357. doi: 10.1016/S0028-3932(00)00138-X
- Facoetti, A., Paganoni, P., & Lorusso, M. L. (2000). The spatial distribution of visual attention in developmental dyslexia. *Exp Brain Res, 132*(4), 531–538.
- Fahle, M. (2005). Perceptual learning : Specificity versus generalization. *Current Opinion in Neurobiology, 15*(2), 154–160. doi: 10.1016/j.conb.2005.03.010
- Fairweather, G., Sanders, D. H., & Tornatzky, L. G. (1974). *Creating Change in Mental Health Organizations* (New York : éd.).
- Fiorentini, A., & Berardi, N. (1980). *Perceptual learning specific for orientation and spatial frequency* (Vol. 287) (N° 5777). doi: 10.1038/287043a0
- Fixsen, D., Naoom, S., Blase, K., Friedman, R., & Wallace, F. (2005). *Implementation Research : A Synthesis Of the literature* (University éd.). doi: 10.1109/ISSRE.2005.28
- Fougnie, D., Cockhren, J., & Marois, R. (2018). A common source of attention for auditory and visual tracking. *Attention, Perception, & Psychophysics*(May), 1–13. doi: 10.3758/s13414-018-1524-9
- Franceschini, S., Gori, S., Ruffino, M., Pedrolli, K., & Facoetti, A. (2012). A causal link between visual spatial attention and reading acquisition. *Current Biology, 22*(9), 814–819. doi: 10.1016/j.cub.2012.03.013

- Franceschini, S., Gori, S., Ruffino, M., Viola, S., Molteni, M., & Facchetti, A. (2013). Action Video Games Make Dyslexic Children Read Better. *Current Biology*, *23*(6), 462–466. doi: 10.1016/j.cub.2013.01.044
- Franceschini, S., Trevisan, P., Ronconi, L., Bertoni, S., Colmar, S., Double, K., ... Gori, S. (2017). Action video games improve reading abilities and visual-to-auditory attentional shifting in English-speaking children with dyslexia. *Scientific Reports*, *7*(1), 1–12. doi: 10.1038/s41598-017-05826-8
- Freeman, S., Eddy, S. L., McDonough, M., Smith, M. K., Okoroafor, N., Jordt, H., & Wenderoth, M. P. (2014). Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *111*(23), 8410–8415. doi: 10.1073/pnas.1319030111
- Frey, A., & Bosse, M. L. (2018). Perceptual span, visual span, and visual attention span : Three potential ways to quantify limits on visual processing during reading. *Visual Cognition*, *0*(0), 1–18. doi: 10.1080/13506285.2018.1472163
- Frintrop, S., Rome, E., & Christensen, H. I. (2010). Computational visual attention systems and their cognitive foundations. *ACM Transactions on Applied Perception*, *7*(1), 1–39. doi: 10.1145/1658349.1658355
- Gentaz, É., Sprenger-Charolles, L., Colé, P., Theurel, A., Gurgand, M., Huron, C., ... Le Cam, M. (2013). Évaluation quantitative d'un entraînement à la lecture à grande échelle pour des enfants de CP scolarisés en réseaux d'éducation prioritaire : Apports et limites. *ANAE - Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant*, *25*(123), 172–181. doi: 10.1007/BF00390513
- Geyer, L. (1977). Recognition and confusion of the lowercase alphabet. *Perception & psychophysics*, *22*(5), 487–490. doi: 10.3758/BF03199550
- Gilbert, C. D., & Li, W. (2013). Top-down influences on visual processing. *Nature Reviews Neuroscience*, *14*(5), 350–363. doi: 10.1038/nrn3476
- Givord, P., & Guillermin, M. (2016). *Méthodologie statistique : Les modèles multi-niveaux*.
- Gopher, D., Well, M., & Bareket, T. (1994). Transfer of skill from a computer game trainer to flight. *Human Factors*, *36*(3), 387–405.
- Goswami, U. (2015). Sensory theories of developmental dyslexia : Three challenges for research. *Nature Reviews Neuroscience*, *16*(1), 43–54. doi: 10.1038/nrn3836
- Green, C. S., & Bavelier, D. (2003). Action video game modifies visual selective attention. *Nature*, *423*(6939), 534–7. doi: 10.1038/nature01647
- Green, C. S., & Bavelier, D. (2006). Enumeration versus multiple object tracking : the case of action video game players. *Cognition*, *101*(1), 217–245. doi: 10.1016/j.cognition.2005.10.004
- Green, C. S., & Bavelier, D. (2007). Action video game experience alters the spatial resolution of vision. *Psychological Science*, *18*(1), 88–94. Consulté sur <http://pss.sagepub.com/content/18/1/88.full> doi: 10.1016/j.biotechadv.2011.08.021.Secreted
- Green, C. S., & Bavelier, D. (2008). Exercising your Brain : a review of human brain plasticity and training induced learning. *Psychology and Aging*, *23*(4), 692–701. doi: 10.1037/a0014345.Exercising
- Green, C. S., & Bavelier, D. (2012). Learning, Attentional Control, and Action Video Games. *Current Biology*, *22*(6), R197–R206. doi: 10.1016/j.cub.2012.02.012
- Grill-Spector, K., & Kanwisher, N. (2005). As Soon as You Know It Is There, You Know What It Is. *Psychological Science*, *16*(2), 152–160. doi: 10.1111/j.0956-7976.2005.00796.x
- Guadagnoli, M. A., & Lee, T. D. (2004). Challenge Point : A Framework for Conceptualizing

- the Effects of Various Practice Conditions in Motor Learning Challenge Point : A Framework for Conceptualizing the Effects of Various Practice Conditions in Motor Learning. *Journal of Motor Behavior*, 36(2), 212–224. doi: 10.3200/JMBR.36.2.212-224doi.org/10.3200/JMBR.36.2.212-224
- Habekost, T., & Starrfelt, R. (2009). Visual attention capacity : A review of TVA-based patient studies : Cognition and Neurosciences. *Scandinavian Journal of Psychology*, 50(1), 23–32. doi: 10.1111/j.1467-9450.2008.00681.x
- Hari, R., & Renvall, H. (2001). Impaired processing of rapid stimulus sequences in dyslexia. *Trends in Cognitive Sciences*, 5(12), 525–532. doi: 10.1016/S1364-6613(00)01801-5
- Harlow, H. (1949). The formation of learning sets. *Psychol. Rev.*, 56, 51–65.
- Hayden, B. Y., & Gallant, J. L. (2009). Combined effects of spatial and feature-based attention on responses of V4 neurons. *Vision Research*, 49(10), 1182–1187. doi: 10.1016/j.visres.2008.06.011
- Hubert-Wallander, B., Green, C. S., Sugarman, M., & Bavelier, D. (2011). Changes in search rate but not in the dynamics of exogenous attention in action videogame players. *Attention, Perception, and Psychophysics*, 73(8), 2399–2412. doi: 10.3758/s13414-011-0194-7
- Hughson, W., & Westlake, H. (1944). Manual for program outline for rehabilitation of aural casualties both military and civilian. *Transactions of the American Academy of Ophthalmology Otolaryngology*, 48, 1–15.
- Intriligator, J., & Cavanagh, P. (2001). The Spatial Resolution of Visual Attention. *Cognitive Psychology*, 43, 171–216. doi: 10.1006
- James, W. (1890). *The principle of psychology*. New York : Henry Holt.
- James-Burdumy, S., Deke, J., Gersten, R., Lugo-Gil, J., Newman-Gonchar, R., Dimino, J., ... Liu, A. Y. H. (2012). Effectiveness of Four Supplemental Reading Comprehension Interventions. *Journal of Research on Educational Effectiveness*, 5(4), 345–383. doi: 10.1080/19345747.2012.698374
- Jans, B., Peters, J. C., & De Weerd, P. (2010). Visual Spatial Attention to Multiple Locations at Once : The Jury Is Still Out. *Psychological Review*, 117(2), 637–682. doi: 10.1037/a0019082
- Janssen, J., Neerinx, M., & van der Wal, C. (2011). Motivating Children to Learn Arithmetic with an Adaptive Robot Game. In *Social robotics* (Vol. 7621). doi: 10.1007/978-3-642-34103-8
- Jarraud, F. (2018). *SOS Conseil scientifique*.
- Joseph, J. S., Chun, M. M., & Nakayama, K. (1997). Attentional requirements in a 'pre-attentive' feature search task. *Nature*, 387(6635), 805–807. doi: 10.1038/42940
- Kaernbach, C. (1991). Simple adaptive testing with the weighted up-down method. *Perception & Psychophysics*, 49(3), 227–229. doi: 10.3758/BF03214307
- Kalyuga, S., & Sweller, J. (2005). Rapid dynamic assessment of expertise to improve the efficiency of adaptive e-learning. *Educational Technology Research and Development*, 53(3), 83–93. doi: 10.1007/BF02504800
- Kang, S. H. K., & Pashler, H. (2012). Learning Painting Styles : Spacing is Advantageous when it Promotes Discriminative Contrast. *Applied Cognitive Psychology*, 26(1), 97–103. doi: 10.1002/acp.1801
- Kastner, S., De Weerd, P., Pinsk, M. a., Elizondo, M. I., Desimone, R., & Ungerleider, L. G. (2001). Modulation of sensory suppression : implications for receptive field sizes in the human visual cortex. *Journal of neurophysiology*, 86, 1398–1411. doi: 0022-3077/01
- Kastner, S., Pinsk, M. A., De Weerd, P., Desimone, R., & Ungerleider, L. G. (1999). Increased

- activity in human visual cortex during directed attention in the absence of visual stimulation. *Neuron*, *22*(4), 751–61. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0896-6273\(00\)80734-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0896-6273(00)80734-5)
- Kastner, S., Weerd, P. D., Desimone, R., & Ungerleider, L. G. (1998). Mechanisms of Directed Attention in the Human Extrastriate Cortex as Revealed by Functional MRI. *Science*, *282*(5386), 108–111. doi: [10.2307/2897781](https://doi.org/10.2307/2897781)
- Kelly, B., & Perkins, D. (Eds.). (2012). *Handbook of Implementation Science for Psychology in Education*. Cambridge University Press.
- Kemp, C., Goodman, N. D., & Tenenbaum, J. B. (2010). Learning to Learn Causal Models. *Cognitive Science*, *34*(7), 1185–1243. doi: [10.1111/j.1551-6709.2010.01128.x](https://doi.org/10.1111/j.1551-6709.2010.01128.x)
- Khan, A. Z., Prost-Lefebvre, M., Salemmé, R., Blohm, G., Rossetti, Y., Tilikete, C., & Pisella, L. (2016). The Attentional Fields of Visual Search in Simultanagnosia and Healthy Individuals : How Object and Space Attention Interact. *Cerebral Cortex*, *26*(3), 1242–1254. doi: [10.1093/cercor/bhv059](https://doi.org/10.1093/cercor/bhv059)
- Kim, Y.-S., Wagner, R. K., & Lopez, D. (2012). Developmental relations between reading fluency and reading comprehension : a longitudinal study from grade 1 to grade 2. *Journal of Experimental Child Psychology*, *113*(1), 93–111.
- Klinkenberg, S., Straatemeier, M., & Van Der Maas, H. L. (2011). Computer adaptive practice of Maths ability using a new item response model for on the fly ability and difficulty estimation. *Computers and Education*, *57*(2), 1813–1824. doi: [10.1016/j.compedu.2011.02.003](https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.02.003)
- Kontsevich, L. L., & Tyler, C. W. (1999). Bayesian adaptive estimation of psychometric slope and threshold. *Vision Research*, *39*(16), 2729–2737. doi: [10.1016/S0042-6989\(98\)00285-5](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(98)00285-5)
- Kozhevnikov, M., Li, Y., Wong, S., Obana, T., & Amihai, I. (2018). Do enhanced states exist? Boosting cognitive capacities through an action video-game. *Cognition*, *173*(February 2017), 93–105. doi: [10.1016/j.cognition.2018.01.006](https://doi.org/10.1016/j.cognition.2018.01.006)
- Krueger, L. E. (1975). Familiarity effects in visual information processing. *Psychological bulletin*, *82*(6), 949–974. doi: [10.1037/0033-2909.82.6.949](https://doi.org/10.1037/0033-2909.82.6.949)
- Kujala, J. V. (2011). Bayesian Adaptive Estimation : A Theoretical Review. *Descriptive and normative approaches to human behavior*, 123–159.
- LaBerge, D., & Samuels, S. J. (1974). Toward a theory of automatic information processing in reading. *Cognitive Psychology*, *6*(2), 293–323. doi: [10.1016/0010-0285\(74\)90015-2](https://doi.org/10.1016/0010-0285(74)90015-2)
- Lachter, J., Ruthruff, E., Lien, M. C., & McCann, R. S. (2008). Is attention needed for word identification? Evidence from the Stroop paradigm. *Psychonomic Bulletin and Review*, *15*(5), 950–955. doi: [10.3758/PBR.15.5.950](https://doi.org/10.3758/PBR.15.5.950)
- Lai, S., Benjamin, R., Schwanenflugel, P., & Kuhn, M. (2014). The longitudinal relationship between reading fluency and reading comprehension skills in second grade children. *Reading and Writing*, *30*(2), 116–138.
- Lallier, M., Donnadieu, S., & Valdois, S. (2013). Investigating the role of visual and auditory search in reading and developmental dyslexia. *Frontiers in Human Neuroscience*, *7*(September), 1–12. doi: [10.3389/fnhum.2013.00597](https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00597)
- Lallier, M., Molinaro, N., Lizarazu, M., Bourguignon, M., & Carreiras, M. (2017). Amodal Atypical Neural Oscillatory Activity in Dyslexia. A Cross-Linguistic Perspective. *Clinical Psychological Science*, *5*(2), 379–401.
- Lallier, M., Tainturier, M. J., Dering, B., Donnadieu, S., Valdois, S., & Thierry, G. (2010). Behavioral and ERP evidence for amodal sluggish attentional shifting in developmental dyslexia. *Neuropsychologia*, *48*(14), 4125–4135. doi: [10.1016/j.neuropsychologia.2010](https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010)

.09.027

- Lallier, M., Thierry, G., Tainturier, M. J., Donnadieu, S., Peyrin, C., Billard, C., & Valdois, S. (2009). Auditory and visual stream segregation in children and adults : An assessment of the amodality assumption of the 'sluggish attentional shifting' theory of dyslexia. *Brain Research, 1302*, 132–147. doi: 10.1016/j.brainres.2009.07.037
- Le Bigot, N., & Grosjean, M. (2012). Effects of handedness on visual sensitivity in perihand space. *PLoS ONE, 7*(8). doi: 10.1371/journal.pone.0043150
- Le Rhun, B. (2013). *Sortants sans diplôme et sortants précoces - Deux estimations du faible niveau d'études des jeunes*.
- Leek, M. R. (2001). Adaptive Procedure in Psychophysical Research. *Perception & Psychophysics, 63*(8), 1279–1292.
- Lennie, P. (2003). The cost of cortical computation. *Current Biology, 13*(6), 493–497. doi: 10.1016/S0960-9822(03)00135-0
- Lesmes, L. A., Jeon, S. T., Lu, Z. L., & Doshier, B. A. (2006). Bayesian adaptive estimation of threshold versus contrast external noise functions : The quick TvC method. *Vision Research, 46*(19), 3160–3176. doi: 10.1016/j.visres.2006.04.022
- Levitt, H. (1971). *Transformed up- down methods in psychoacoustics* (Vol. 49) (N° 2 pt 2). doi: 10.1121/1.1912375
- Li, R., Ngo, C., Nguyen, J., & Levi, D. M. (2011). Video-Game Play Induces Plasticity in the Visual System of Adults with Amblyopia. *PLoS Biology, 9*(8), e1001135. Consulté sur <http://dx.plos.org/10.1371/journal.pbio.1001135> doi: 10.1371/journal.pbio.1001135
- Li, R., Polat, U., Makous, W., & Bavelier, D. (2009). Enhancing the contrast sensitivity function through action video game training. *Nature neuroscience, 12*(5), 549–551. doi: 10.1038/nm.2296
- Lieberman, H. R., & Pentland, A. P. (1982). Microcomputer-based estimation of psychophysical thresholds : The Best PEST. *Behavior Research Methods & Instrumentation, 14*(1), 21–25. doi: 10.3758/BF03202110
- Ling, S., Liu, T., & Carrasco, M. (2009). How spatial and feature-based attention affect the gain and tuning of population responses. *Vision Research, 49*(10), 1194–1204. doi: 10.1016/j.visres.2008.05.025
- Little, C. W., & Hart, S. A. (2016). Examining the genetic and environmental associations among spelling, reading fluency, reading comprehension and a high stakes reading test in a combined sample of third and fourth grade students. *Learning and individual differences, 45*(1), 25–32.
- Lloyd, D. M., Azañón, E., & Poliakoff, E. (2010). Right hand presence modulates shifts of exogenous visuospatial attention in near perihand space. *Brain and Cognition, 73*(2), 102–109. doi: 10.1016/j.bandc.2010.03.006
- Lobier, M. (2008). *Conception d'un logiciel de rééducation des troubles de l'empan visuo-attentionnel* (Thèse de doctorat non publiée). Université Grenoble Alpes, Grenoble.
- Lobier, M., Dubois, M., & Valdois, S. (2013). The Role of Visual Processing Speed in Reading Speed Development. , *8*(4). doi: 10.1371/journal.pone.0058097
- Lobier, M., Peyrin, C., Le Bas, J. F., & Valdois, S. (2012). Pre-orthographic character string processing and parietal cortex : A role for visual attention in reading? *Neuropsychologia, 50*(9), 2195–2204. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2012.05.023
- Lobier, M., Peyrin, C., Pichat, C., Le Bas, J.-F., & Valdois, S. (2014). Visual processing of multiple elements in the dyslexic brain : evidence for a superior parietal dysfunction. *Frontiers in Human Neuroscience, 8*(July), 1–16. doi: 10.3389/fnhum.2014.00479

- Lobier, M., Zoubrinetzky, R., & Valdois, S. (2012). The visual attention span deficit in dyslexia is visual and not verbal. *Cortex*, *48*(6), 768–773. doi: 10.1016/j.cortex.2011.09.003
- Lu, Z. L., Tse, H. C. H., Doshier, B. A., Lesmes, L. A., Posner, C., & Chu, W. (2009). Intra- and cross-modal cuing of spatial attention : Time courses and mechanisms. *Vision Research*, *49*(10), 1081–1096. doi: 10.1016/j.visres.2008.05.021
- Luck, S. J., Chelazzi, L., Hillyard, S. A., & Desimone, R. (1997). Neural Mechanisms of Spatial Selective Attention in Areas V1, V2, and V4 of Macaque Visual Cortex. *Journal of Neurophysiology*, *77*(1), 24–42. doi: 10.1152/jn.1997.77.1.24
- Lum, J. A. G., Conti-Ramsden, G., & Lindell, A. K. (2007). The attentional blink reveals sluggish attentional shifting in adolescents with specific language impairment. *Brain and Cognition*, *63*(3), 287–295. doi: 10.1016/j.bandc.2006.09.010
- Łuniewska, M., Chyl, K., Dębska, A., Kacprzak, A., Plewko, J., Szczerbiński, M., ... Jednoróg, K. (2018). Neither action nor phonological video games make dyslexic children read better. *Scientific Reports*, *8*, 549. doi: 10.1038/s41598-017-18878-7
- Marinus, E., Kezilas, Y., Kohnen, S., Robidoux, S., & Castles, A. (2018). Who Are the Noisiest Neighbors in the Hood? Using Error Analyses to Study the Acquisition of Letter-Position Processing. *Journal of Experimental Psychology : Learning Memory and Cognition*, *44*(9), 1384–1396. doi: 10.1037/xlm0000524
- Mayfield, K. H., & Chase, P. N. (2002). The effects of cumulative practice on mathematics problem solving. *Journal of applied behavior analysis*, *35*(2), 105–123. doi: 10.1901/jaba.2002.35-105
- McCandliss, B. D., Cohen, L., & Dehaene, S. (2003). The visual word form area : Expertise for reading in the fusiform gyrus. *Trends in Cognitive Sciences*, *7*(7), 293–299. doi: 10.1016/S1364-6613(03)00134-7
- McCann, R., Folk, C., & Johnston, J. (1992). The role of spatial attention in visual word processing. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, *18*(4), 1015–1029. doi: 10.1037/0096-1523.18.4.1015
- Mcclelland, J. L., Mirman, D., & Bolger, D. J. (2014). Interactive Activation and Mutual Constraint Satisfaction in Perception and Cognition. *Cognitive Science*, *38*, 1139–1189. doi: 10.1111/cogs.12146
- McConkie, G. W., & Rayner, K. (1975). The span of the effective stimulus during a fixation in reading. *Perception & Psychophysics*, *17*(6), 578–586. doi: 10.3758/BF03203972
- MENESR. (2017). *Les chiffres clés du système éducatif - Année 2016/2017* (Rapport technique). Ministère de l'Éducation nationale et de la Jeunesse.
- Mishra, J., Zinni, M., Bavelier, D., & Hillyard, S. A. (2011). Neural Basis of Superior Performance of Action Videogame Players in an Attention-Demanding Task. *Journal of Neuroscience*, *31*(3), 992–998. doi: 10.1523/JNEUROSCI.4834-10.2011
- Mueller, S. T., & Weidemann, C. T. (2012). Alphabetic letter identification : Effects of perceivability, similarity, and bias. *Acta Psychologica*, *6*(9), 19–37. doi: 10.1021/nl061786n.Core-Shell
- Muller, H. J., & Rabbitt, M. A. (1989). Reflexive and voluntary orienting of visual attention : time course of activation and resistance to interruption. *J. Exp. Psychol.*, *15*(June), 315–330. doi: 10.1037//0096-1523.15.2.315
- National Institute of Child Health and Human Development. (2000). *National Reading Panel - Teaching children to read : An evidence-based assessment of the scientific research literature on reading and its implications for reading instruction.*
- New, B., & Grainger, J. (2011). Acta Psychologica On letter frequency effects. *ACTPSY*,

- 138(2), 322–328. Consulté sur <http://dx.doi.org/10.1016/j.actpsy.2011.07.001>  
doi: 10.1016/j.actpsy.2011.07.001
- New, B., Pallier, C., Ferrand, L., & Matos, R. (2001). Une base de données lexicales du français contemporain sur internet. *L'Année Psychologique*, 101, 447–462.
- Nicholls, J. G., & Miller, A. T. (1983). The Differentiation of the Concepts of Difficulty and Ability. *Child Development*, 54(4), 951–959.
- Nunes, T., Bryant, P., Strand, S., Hillier, J., Barros, R., & Miller-Friedmann, J. (2017). *Review of SES and Science Learning in Formal Educational Settings* (Rapport technique N° September). Education Endowment Foundation.
- OCDE. (2016). Global competency for an inclusive world. , 40.
- O'Craven, K. M., Downing, P. E., & Kanwisher, N. (1999). fMRI evidence for objects as the units of attentional selection. *Nature*, 401(January 1995), 584–587.
- O'Regan, J. K. (1990). Eye movements and reading. In E. Kowler (Ed.), *Eye movements and their role in visual and cognitive processes* (pp. 195–453). New York : Elsevier.
- Orvis, K. A., Horn, D. B., & Belanich, J. (2008). The roles of task difficulty and prior videogame experience on performance and motivation in instructional videogames. *Computers in Human Behavior*, 24(5), 2415–2433. doi: 10.1016/j.chb.2008.02.016
- Oudeyer, P.-Y., Gottlieb, J., & Lopes, M. (2016). Intrinsic motivation, curiosity, and learning : Theory and applications in educational technologies. *Progress in brain research*, 229, 257–284. doi: 10.1016/bs.pbr.2016.05.005
- Owen, A. M., Hampshire, A., Grahn, J. A., Stenton, R., Dajani, S., Burns, A. S., . . . Ballard, C. G. (2010). Putting brain training to the test. *Nature*, 465(7299), 775–778. doi: 10.1038/nature09042
- Panzano, P. C., & Roth, D. (2006). The decision to adopt evidence-based and other innovative mental health practices : Risky business ? 57, 1153–61. *Psychiatric Services*, 57, 1153–1161.
- Pashler, H., McDaniel, M., Rohrer, D., & Bjork, R. (2009). Learning Styles : Concepts and Evidence. *Psychological Science in the Public Interest*, 9(3), 105–119. doi: 10.1111/j.1539-6053.2009.01038.x
- Pasqualotto, A., Altarelli, I., Menestrina, Z., Bavelier, D., & Venuti, P. (2018). Enhancing executive functions and reading skills in typically developing children with “ Skies of Manawak ” : a videogame for cognitive training. Manuscript in Preparation.
- Pavan, A., Boyce, M., & Ghin, F. (2016). Action Video Games Improve Direction Discrimination of Parafoveal Translational Global Motion but Not Reaction Times. *Perception*, 45(10), 1193–1202. doi: 10.1177/0301006616663215
- Pedersen, C., Togelius, J., & Yannakakis, G. N. (2010). Modeling player experience for content creation. *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*, 2(1), 54–67. doi: 10.1109/TCIAIG.2010.2043950
- Peelen, M. V., Heslenfeld, D. J., & Theeuwes, J. (2004). Endogenous and exogenous attention shifts are mediated by the same large-scale neural network. *NeuroImage*, 22(2), 822–830. doi: 10.1016/j.neuroimage.2004.01.044
- Pelli, D. G., Burns, C. W., Farell, B., & Moore-Page, D. C. (2006). Feature detection and letter identification. *Vision Research*, 46(28), 4646–4674. doi: 10.1016/j.visres.2006.04.023
- Perry, C., Ziegler, J. C., & Zorzi, M. (2010). Beyond single syllables : Large-scale modeling of reading aloud with the Connectionist Dual Process (CDP++) model. *Cognitive Psychology*, 61(2), 106–151. doi: 10.1016/j.cogpsych.2010.04.001
- Pestilli, F., & Carrasco, M. (2005). Attention enhances contrast sensitivity at cued and

- impairs it at uncued locations. *Vision Research*, 45(14), 1867–1875. doi: 10.1016/j.visres.2005.01.019
- Petersen, S., & Posner, M. (2012). The attention system of the human brain : 20 years after. *Annual review of neuroscience*, 21(35), 73–89. doi: 10.1146/annurev-neuro-062111-150525.The
- Peterson, R., Pennington, B., Olson, R., & Wadsworth, S. (2014). Longitudinal Stability of Phonological and Surface Subtypes of Developmental Dyslexia. *Sci Stud Read*, 18(5), 347–362. doi: 10.1080/10888438.2014.904870.Longitudinal
- Petty, R. E., Briñl, P., Tormala, Z. L., Blair, W., & Jarvis, G. (2006). Implicit ambivalence from attitude change : An exploration of the PAST model. *Journal of Personality and Social Psychology*, 90(1), 21–41. doi: 10.1037/0022-3514.90.1.21
- Peyrin, C., Démonet, J. F., N’Guyen-Morel, M. A., Le Bas, J. F., & Valdois, S. (2011). Superior parietal lobule dysfunction in a homogeneous group of dyslexic children with a visual attention span disorder. *Brain and Language*, 118(3), 128–138. doi: 10.1016/j.bandl.2010.06.005
- Peyrin, C., Lallier, M., Démonet, J. F., Pernet, C., Baciú, M., Le Bas, J. F., & Valdois, S. (2012). Neural dissociation of phonological and visual attention span disorders in developmental dyslexia : fMRI evidence from two case reports. *Brain and Language*, 120(3), 381–394. doi: 10.1016/j.bandl.2011.12.015
- Phénix, T. (2018). *Modélisation bayésienne algorithmique de la reconnaissance visuelle de mots et de l’attention visuelle* (Thèse de doctorat non publiée). Université Grenoble Alpes.
- Phénix, T., Diard, J., & Valdois, S. (2017). Les modèles computationnels de lecture. In *Traité de neurolinguistique* (pp. 167–182).
- Phénix, T., Valdois, S., & Diard, J. (2018). Reconciling opposite neighborhood frequency effects in lexical decision : Evidence from a novel probabilistic model of visual word recognition. In T. Rogers, M. Rau, X. Zhu, & C. W. Kalish (Eds.), *Proceedings of the 40th annual conference of the cognitive science society* (pp. 2238—2243). Cognitive Science Society.
- Posner, M. (1980). Orienting of Attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32, 3–25. doi: 10.1080/00335558008248231
- Posner, M., Nissen, M. J., & Ogden, W. C. (1978). Attended and unattended processing modes : the role of set for spatial location. In *Modes of perceiving and processing information*. (pp. 137–157). doi: 10.1080/00335558008248231
- Posner, M., & Snyder, C. R. R. (1975). Attention and cognitive control. In D. A. Balota & E. J. Marsh (Eds.), *Cognitive psychology : Key readings. key readings in cognition* (pp. 205–223). New York, NY : Psychology Press.
- 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*, 42(3), 722–770. doi: 10.1111/cogs.12571
- Prost, A. (1979). L’alphabétisation des Français de Calvin à Jules Ferry. *Revue française de pédagogie*, 46, 73–75.
- Raab, G. M., & Butcher, I. (2001). Balance in Cluster Randomized Trials.”. In *Statistics in medicine 20* (pp. 351–365). Wiley Online Library.
- Ramus, F., Rosen, S., Dakin, S. C., Day, B. L., Castellote, J. M., White, S., & Frith, U. (2003). Theories of developmental dyslexia : insights from a multiple case study of dyslexic adults. *Brain*, 126(4), 841–865.
- Rauscher, F. H., Shaw, G. L., Levine, L. J., Wright, E. L., Dennis, W. R., & Newcomb,

- R. L. (1997). *Music training causes long-term enhancement of preschool children's spatial-temporal reasoning* (Vol. 19) (N° 1). doi: 10.1080/01616412.1997.11740765
- Rayner, K. (2014). The gaze-contingent moving window in reading : Development and review. *Visual Cognition*, 22(3-4), 242–258.
- Reed, C. L., Grubb, J. D., & Steele, C. (2006). Hands up : Attentional prioritization of space near the hand. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 32(1), 166–177. doi: 10.1037/0096-1523.32.1.166
- Reichle, E. D., Warren, T., & McConnell, K. (2009). Using E-Z reader to model the effects of higher level language processing on eye movements during reading. *Psychonomic Bulletin and Review*, 16(1), 1–21. doi: 10.3758/PBR.16.1.1
- Reilhac, C., Peyrin, C., Démonet, J. F., & Valdois, S. (2013). Role of the superior parietal lobules in letter-identity processing within strings : fMRI evidence from skilled and dyslexic readers. *Neuropsychologia*, 51(4), 601–612. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2012.12.010
- Reynolds, J. H., Chelazzi, L., & Desimone, R. (1999). Competitive mechanisms subserve attention in macaque areas V2 and V4. *Journal of Neuroscience*, 19(5), 1736–1753. doi: 10.1523/jneurosci.4499-07.2008
- Reynolds, J. H., & Desimone, R. (2003). Interacting roles of attention and visual salience in V4. *Neuron*, 37(5), 853–863. doi: 10.1016/S0896-6273(03)00097-7
- Reynolds, J. H., & Pasternak, T. (2000). Attention Increases Sensitivity of V4 Neurons. *Neuron*, 26, 703–714. doi: 10.1016/S0896-6273(00)81206-4
- Rimfeld, K., Kovas, Y., Dale, P. S., & Plomin, R. (2016). True grit and genetics : Predicting academic achievement from personality. *Journal of Personality and Social Psychology*, 111(5), 780–789. doi: 10.1037/pspp0000089
- Robidoux, S., & Besner, D. (2015). Conflict resolved : On the role of spatial attention in reading and color naming tasks. *Psychonomic Bulletin and Review*, 22(6), 1709–1716. doi: 10.3758/s13423-015-0830-7
- Rohrer, D., & Taylor, K. (2007). The shuffling of mathematics problems improves learning. *Instructional Science*, 35(6), 481–498. doi: 10.1007/s11251-007-9015-8
- Rosser, J., Lynch, P., Cuddihy, L., Gentile, D., Klonsky, J., & Merrell, R. (2007). The impact of video games on training surgeons in the 21st century. *Archives of Surgery*, 142, 181.
- Ryan, R. M., & Deci, E. L. (2000). Intrinsic and Extrinsic Motivations : Classic Definitions and New Directions. *Contemporary Educational Psychology*, 25, 54–67. doi: 10.1006/ceps.1999.1020
- Sampayo-Vargas, S., Cope, C. J., He, Z., & Byrne, G. J. (2013). The effectiveness of adaptive difficulty adjustments on students' motivation and learning in an educational computer game. *Computers and Education*, 69, 452–462. doi: 10.1016/j.compedu.2013.07.004
- Schadenberg, B. R., Neerinx, M. A., Cnossen, F., & Looije, R. (2016). Personalising game difficulty to keep children motivated to play with a social robot : A Bayesian approach. *Cognitive Systems Research*, 43, 222–231. doi: 10.1016/j.cogsys.2016.08.003
- Schellenberg, E. G. (2004). Music lessons enhance IQ. *Psychological Science*, 15(8), 511–514. doi: 10.1111/j.0956-7976.2004.00711.x
- Schmidt, R. A., & Bjork, R. A. (1992). New Conceptualizations of Practice : Common Principles in Three Paradigms Suggest New Concepts for Training. *Psychological Science*, 3(4), 207–217. doi: 10.1111/j.1467-9280.1992.tb00029.x
- Schnotz, W., & Kürschner, C. (2007). A reconsideration of cognitive load theory. *Educational Psychology Review*, 19(4), 469–508. doi: 10.1007/s10648-007-9053-4

- Schofield, M. J., Edwards, K., & Pearce, R. (1997). Effectiveness of two strategies for dissemination of sun-protection policy in New South Wales primary and secondary schools. *Australian and New Zealand Journal of Public Health*, *21*(7), 743.
- Scholl, B. J. (2001). Objects and attention : The state of the art. *Cognition*, *80*(1-2), 1–46. doi: 10.1016/S0010-0277(00)00152-9
- Sears, C. R., Sears, C. R., Hino, Y., & Lupker, S. J. (1995). Neighborhood Size and Neighborhood Frequency Effects in Word Recognition Neighborhood Size and Neighborhood Frequency Effects in Word Recognition. *Journal of Experimental Psychology Human Perception & Performance*, *21*(4), 876–900. doi: 10.1037/0096-1523.21.4.876
- Segal, A. (2011). *Do gestural interfaces promote thinking ? Embodied interaction : Congruent gestures and direct touch promote performance in math* (Thèse de doctorat, Columbia University). doi: 10.1017/CBO9781107415324.004
- Serences, J. T., & Boynton, G. M. (2007). Feature-Based Attentional Modulations in the Absence of Direct Visual Stimulation. *Neuron*, *55*(2), 301–312. doi: 10.1016/j.neuron.2007.06.015
- Serences, J. T., & Yantis, S. (2006). Selective visual attention and perceptual coherence. *Trends in Cognitive Sciences*, *10*(1), 38–45. doi: 10.1016/j.tics.2005.11.008
- Share, D. L. (1995). Phonological recoding and self-teaching : sine qua non of reading acquisition. *Cognition*, *55*(2), 151–218. doi: 10.1016/0010-0277(94)00645-2
- Simpson, I. C., Mousikou, P., Montoya, J. M., & Defior, S. (2012). A letter visual-similarity matrix for Latin-based alphabets. *Behavior Research Methods*(October), 431–439. doi: 10.3758/s13428-012-0271-4
- Smith, A. T., Singh, K. D., & Greenlee, M. W. (2000). Attentional suppression of activity in the human visual cortex. *NeuroReport*, *11*(2), 271–278. doi: 10.1097/00001756-200002070-00010
- Sprague, T. C., & Serences, J. T. (2013). Attention modulates spatial priority maps in the human occipital, parietal and frontal cortices. *Nature neuroscience*, *16*(12), 1879–1887. doi: 10.1016/j.jhsa.2009.09.008.Validity
- Sprenger-Charolles, L., Siegel, L. S., Jimenez, J., & 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.
- Stanovich, K. E., Siegel, L. S., & Gottardo, A. (1997). Converging evidence for phonological and surface subtypes of reading disability. *Journal of Educational Psychology*, *89*(1), 114–127.
- Stenneken, P., Egetemeir, J., Schulte-Körne, G., Müller, H. J., Schneider, W. X., & Finke, K. (2011). Slow perceptual processing at the core of developmental dyslexia : A parameter-based assessment of visual attention. *Neuropsychologia*, *49*(12), 3454–3465. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2011.08.021
- Sungur, H., & Boduroglu, A. (2012). Action video game players form more detailed representation of objects. *Acta Psychologica*, *139*(2), 327–334. doi: 10.1016/j.actpsy.2011.12.002
- Taylor, M. M., Forbes, S., & Creelman, C. D. (1983). PEST reduces bias in forced choice psychophysics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *74*(5), 1367–1374.
- Thomas, T., & Sunny, M. M. (2017). Slower attentional disengagement but faster perceptual processing near the hand. *Acta Psychologica*, *174*, 40–47. doi: 10.1016/j.actpsy.2017.01.005
- Thomson, J. M., Leong, V., & Goswami, U. (2013). Auditory processing interventions and

- developmental dyslexia : a comparison of phonemic and rhythmic approaches. *Reading and Writing : An Interdisciplinary Journal*, 26(2), 139–161.
- Titchener, E. B. (1908). *Lectures on the elementary psychology of feeling and attention* (Macmillan éd.). New York, NY.
- Townsend, J. T. (1971). Theoretical analysis of an alphabetic confusion matrix. *Perception & Psychophysics*, 9(September), 40–50. doi: 10.3758/BF03213026
- Treisman, A. (2006). How the deployment of attention determines what we see. *Visual Cognition*, 14(4-8), 411–443. doi: 10.1080/13506280500195250
- Treisman, A., & Gelade, G. (1980). A Feature-Integration Theory of Attention. *Cognitive Psychology*, 12, 97–136. doi: 10.1016/0010-0285(80)90005-5
- Tressoldi, P., Lorusso, M. L., Brenbati, F., & Donini, R. (2007). Fluency Remediation in Dyslexic Children : Does Age Make a Difference? *Dyslexia*, 16, 300–317. doi: 10.1002/dys
- Tseng, P., Bridgeman, B., & Juan, C. H. (2012). Take the matter into your own hands : A brief review of the effect of nearby-hands on visual processing. *Vision Research*, 72, 74–77. doi: 10.1016/j.visres.2012.09.005
- Valdois, S., Bidet-Ildei, C., Lassus-Sangosse, D., Reilhac, C., N’guyen-Morel, M. A., Guinet, E., & Orliaguet, J. P. (2011). A visual processing but no phonological disorder in a child with mixed dyslexia. , 47(10), 1197–1218. *Cortex*, 47(10), 1197–1218.
- Valdois, S., Bosse, M. L., & Peyrin, C. (2014). *COREVA : exercices progressifs d’entraînement des capacités d’empan visuo-attentionnel*. OrthoEdition.
- Valdois, S., Bosse, M. L., & Tainturier, M. J. (2004). The cognitive deficits responsible for developmental dyslexia : Review of evidence for a selective visual attentional disorder. *Dyslexia*, 10(4), 339–363. doi: 10.1002/dys.284
- Valdois, S., Lassus-Sangosse, D., Lallier, M., Moreaud, O., & Pisella, L. (2018). What bilateral damage of the superior parietal lobes tells us about visual attention disorders in developmental dyslexia. *Neuropsychologia*, 1–14. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2018.08.001
- Valdois, S., Peyrin, C., Lassus-Sangosse, D., Lallier, M., Demonet, J. F., & Kandel, S. (2014). Dyslexia in a French-Spanish bilingual girl : Behavioural and neural modulations following a visual attention span intervention. *Cortex*, 53(1), 120–145. doi: 10.1016/j.cortex.2013.11.006
- Valdois, S., Roulin, J., & Bosse, M. (2018). First grade reading fluency depends on pre-readers’ visual attention span (submitted).
- 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. doi: 10.1016/j.tics.2009.12.003
- Vierck, E., & Miller, J. (2005). Direct selection by color for visual encoding. *Perception and Psychophysics*, 67(3), 483–494. doi: 10.3758/BF03193326
- Vygotsky, L. (1980). *Mind in society : The development of higher psychological processes* (Harvard un éd.).
- Waechter, S., Besner, D., & Stolz, J. A. (2011). Basic processes in reading : Spatial attention as a necessary preliminary to orthographic and semantic processing. *Visual Cognition*, 19(2), 171–202. doi: 10.1080/13506285.2010.517228
- Watson, A. B. (2017). QUEST+ : A general multidimensional Bayesian adaptive psychometric method. *Journal of Vision*, 17(3), 10. doi: 10.1167/17.3.10
- Watson, A. B., & Pelli, D. G. (1983). Quest : A Bayesian adaptive psychometric method. *Perception & Psychophysics*, 33(2), 113–120. doi: 10.3758/BF03202828

- West, G. L., Stevens, S. A., & Pratt, J. (2008). Visuospatial experience modulates attentional capture : Evidence from action video game players. *Journal of Vision*, *8*(2008), 1–9. doi: 10.1167/8.16.13.Introduction
- Whitney, D., & Levi, D. M. (2011). Visual Crowding : a fundamental limit on conscious perception and object recognition. *Trends Cogn Sci*, *15*(4), 160–168. doi: 10.1016/j.tics.2011.02.005.Visual
- Wilkinson, G. N., & Rogers, C. E. (1973). Symbolic Description of Factorial Models for Analysis of Variance. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, *22*(3), 392–399.
- Wilms, I. L., Petersen, A., & Vangkilde, S. (2013). Intensive video gaming improves encoding speed to visual short-term memory in young male adults. *Acta Psychologica*, *142*(1), 108–118. doi: 10.1016/j.actpsy.2012.11.003
- Wilson, A. J., Revkin, S. K., Cohen, D., Cohen, L., & Dehaene, S. (2006). Principles underlying the design of "The Number Race", an adaptative computer game for remediation of dyscalculia. *Behavioral and brain functions : BBF*, *2*, 20. doi: 10.1186/1744-9081-2-19
- Wolters, C. A., & Hussain, M. (2015). Investigating grit and its relations with college students' self-regulated learning and academic achievement. *Metacognition and Learning*, *10*(3), 293–311. doi: 10.1007/s11409-014-9128-9
- Wulf, G., & Shea, C. H. (2002). Principles derived from the study of simple skills do not generalize to complex skill learning. *Psychonomic Bulletin and Review*, *9*(2), 185–211. doi: 10.3758/BF03196276
- Yeshurun, Y., & Carrasco, M. (1998). Attention improves or impairs visual performance by enhancing spatial resolution. , *396*(6702), 72. doi: 10.1007/s10439-011-0452-9.Engineering
- Yeshurun, Y., & Carrasco, M. (2008). The effects of transient attention on spatial resolution and the size of the attentional cue YAFFA. *Perception & Psychophysics*, *70*(1), 104–113. doi: 10.3758/PP
- Yeshurun, Y., & Rashal, E. (2010). Precueing attention to the target location diminishes crowding and reduces the critical distance. *Journal of vision*, *10*(10), 16. doi: 10.1167/10.10.16
- Ziegler, J. C., Besson, M., Jacobs, A. M., Nazir, T. A., & Carr, T. H. (1997). Word, pseudoword and nonword Processing : A Multitask Comparison Using Event-Related Brain Potentials. *J. Cogn. Neuroscience*, *9*(6), 758–775. doi: 10.1162/jocn.1997.9.6.758
- Ziegler, J. C., Castel, C., Pech-Georgel, C., Alario, F., & Perry, C. (2008). Developmental dyslexia and the dual route model of reading : Simulating individual differences and subtypes. *Cognition*, *107*, 151–178.
- 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. Series B, Biological sciences*, *369*(1634), 20120397. doi: 10.1098/rstb.2012.0397
- Zoubinetzky, R. (2015). *Hétérogénéité Cognitive et Remédiation des Dyslexies Développementales* (Thèse de doctorat non publiée). Université Grenoble Alpes.
- Zoubinetzky, R., Collet, G., N'Guyen-Morel, M., Valdois, S., & Serniclaes, W. (2018). Remediation of allophonic perception and visual attention span in developmental dyslexia : a joint assay (submitted).
- Zoubinetzky, R., Collet, G., Serniclaes, W., Nguyen-Morel, M.-A., & Valdois, S. (2016).

Relationships between Categorical Perception of Phonemes, Phoneme Awareness, and Visual Attention Span in Developmental Dyslexia. *Plos One*, 11(3), e0151015. doi: 10.1371/journal.pone.0151015

# Annexe A

## Matrice de confusion générées pour les lettres romaines minuscules et majuscules

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z
a	1	8	13	4	2	20	6	15	12	25	26	22	3	9	5	14	10	18	7	19	11	21	17	23	24	16
b	12	1	10	6	13	16	4	2	21	20	3	14	19	11	5	7	8	22	15	17	9	18	24	25	23	26
c	8	10	1	11	2	18	7	24	25	23	22	26	19	9	4	13	12	5	3	16	14	6	20	17	21	15
d	7	2	11	1	14	16	5	12	9	10	19	8	18	23	4	6	3	20	24	17	13	15	26	22	25	21
e	2	12	10	9	1	16	6	22	25	18	23	26	13	8	3	7	4	15	5	21	14	20	11	19	24	17
f	24	23	9	7	10	1	8	11	6	3	12	5	21	25	26	16	15	4	20	2	22	19	18	13	14	17
g	3	10	16	9	6	17	1	18	25	5	22	19	13	14	8	4	2	26	12	23	11	21	15	24	7	20
h	18	3	21	11	25	15	22	1	13	14	2	8	5	4	19	9	20	7	26	6	10	16	17	24	12	23
i	21	23	17	7	26	5	24	10	1	3	6	2	9	19	13	14	18	12	25	4	20	15	16	8	11	22
j	22	20	21	9	25	3	7	18	4	1	14	2	24	23	26	15	11	8	16	5	17	10	19	12	6	13
k	17	5	22	18	16	12	25	3	10	20	1	4	21	15	23	19	24	13	14	6	25	11	8	2	7	9
l	24	10	22	7	25	4	23	8	2	5	6	1	20	19	21	14	13	9	17	3	26	16	15	11	12	18
m	5	24	16	26	23	12	15	6	14	21	22	18	1	2	19	13	20	4	7	25	9	10	3	8	17	11
n	6	14	8	11	16	21	23	3	18	19	25	22	2	1	7	12	13	5	17	26	4	9	10	24	20	15
o	7	9	3	11	2	23	13	19	16	22	26	24	12	8	1	4	6	20	10	25	5	14	15	21	17	18
p	11	2	12	7	10	23	3	8	22	15	18	24	13	17	5	1	4	14	16	19	20	26	9	25	6	21
q	6	13	15	4	11	12	2	7	24	14	18	9	16	17	5	3	1	21	20	19	8	26	23	25	10	22
r	17	25	13	23	14	2	12	10	4	9	18	21	19	15	24	6	26	1	7	3	20	11	22	5	16	8
s	4	23	6	24	3	18	10	26	21	22	20	25	9	8	7	12	13	14	1	16	19	17	11	5	15	2
t	25	16	10	13	19	2	24	14	3	6	4	5	21	26	22	23	17	7	15	1	18	11	20	8	12	9
u	10	14	11	12	15	25	23	7	19	16	21	20	5	4	8	26	18	17	22	24	1	3	2	13	6	9
v	25	17	10	24	19	22	26	16	13	14	8	9	20	11	12	23	21	7	15	18	4	1	2	5	3	6
w	16	25	11	26	13	14	22	18	15	17	9	10	5	8	23	24	20	19	12	21	7	2	1	6	4	3
x	15	25	11	26	10	21	20	22	8	18	2	12	14	17	19	23	24	9	6	13	16	4	5	1	7	3
y	23	24	22	26	20	13	9	21	18	7	8	14	19	25	17	10	11	16	15	12	6	2	4	3	1	5
z	10	24	5	25	7	14	13	26	12	15	11	22	20	18	21	16	23	8	2	17	19	9	4	3	6	1

TABLEAU A.1 – Matrice de confusion des lettres minuscules



## Annexe B

# Règles et exemple de génération des distracteurs en fonction du cran de difficulté sélectionné pour un stimulus-cible

Difficulté	Règle pour les séquences de 2 lettres	Exemple :
1	Sélection d'une autre de nos syllabes	NE AU
2	Lettre la plus similaire à la 1ère lettre + Lettre la plus similaire à la 2ème lettre	MF
3	Conservation de la 1ère lettre + Lettre peu similaire à la 2ème lettre	NY
4	Lettre la plus similaire à la 1e lettre + conservation de la 2ème lettre	ME
5	Inversion de la 1ère et 2ème lettre	EN
6	Conservation de la 1ère lettre + lettre la plus similaire à la 2ème lettre	NF

**TABLEAU B.1** – Règles et exemple de génération des distracteurs en fonction du cran de difficulté sélectionné pour un stimulus-cible de longueur 2

Difficulté	Règle pour syllabe à 3 lettres CCV	Exemple :
1	Sélection d'une autre de nos syllabes	VRE ANI
2	Lettre la plus similaire à la 1ère lettre + Conservation de la 2ème lettre + Lettre la plus similaire à la 3ème lettre	URA
3	Lettre la plus similaire à la 1ère lettre + Conservation de la 2ème lettre et 3ème lettre	URE
4	Conservation de la 1ère et 2ème lettre + Lettre peu similaire à la 3ème lettre	VRU
5	Conservation de la 1ère + Lettre la plus similaire à la seconde lettre + Conservation de la 3ème lettre	VBE
6	Conservation de la 1ère lettre + inversion 2ème et 3ème lettre	VER

**TABLEAU B.2** – Règles et exemple de génération des distracteurs en fonction du cran de difficulté sélectionné pour un stimulus-cible de longueur 3 de type CCV

Difficulté	Règle pour syllabe à 3 lettres non CCV	Exemple :
1	Sélection d'une autre de nos syllabes	SOU
2	Lettre la plus similaire à la 1ère lettre, la 2ème et la 3ème lettre	AIR
3	Lettre la plus similaire à la 1ère lettre + Conservation de la 2ème lettre + Lettre la plus similaire à la 3ème lettre	ZAV
4	Conservation de la 1ère et 2ème lettre + Lettre la plus similaire à la 3ème lettre	ZOV
5	Déplacement de la 1ère lettre en fin de la syllabe	SOV
6	Conservation de la 1ère lettre + inversion 2ème et 3ème lettre	OUS
		SUO

**TABLEAU B.3** – Règles et exemple de génération des distracteurs en fonction du cran de difficulté sélectionné pour un stimulus-cible de longueur 3 qui ne sont pas de type CCV

Difficulté	Règle pour syllabe à 4 lettres	Exemple :
1	Sélection d'une autre de nos syllabes	LOUR
2	Lettre la plus similaire à la 1ère lettre + conservation de la 2ème + Lettre similaire à la 3ème lettre + Lettre similaire à la 4ème lettre	MAIN
3	Lettre la plus similaire à la 1ère lettre + conservation de la 2ème et la 3ème lettre + Lettre la plus similaire à la 4ème lettre	TOIP
4	Inversion des deux dernières lettres avec les deux premières	TOUP
5	Conservation de la 1ère, 2ème et 3ème lettre + Lettre la plus similaire à la 4ème lettre	ROUL
6	Conservation de la 1ère lettre + inversion 2ème et 3ème lettre + Conservation de la 4ème lettre	LOUP
		LUOR

**TABLEAU B.4** – Règles et exemple de génération des distracteurs en fonction du cran de difficulté sélectionné pour un stimulus-cible de longueur 4

## Annexe C

### Tableau des simuli-cible et distracteurs utilisés par Evasion

Stimulus-cible	Difficulté 1	Difficulté 2	Difficulté 3	Difficulté 4	Difficulté 5	Difficulté 6
SEUL	MAIN	ZOUT	ZEUT	LEUS	SEUT	SUEL
MAIN	SEUL	WOIM	WAIM	NAIM	MAIM	MIAN
PLEU	MAIN	FLAV	FLEV	EUPL	PLEV	PELU
QUAN	LION	GUIM	GUAM	NAQU	QUAM	QUAN
TEUR	TION	FEIP	FEUP	REUT	TEUP	TUER
POUR	CHOI	BAUP	BOUP	ROUP	POUB	PUOR
PEAU	CHAN	BEIV	BEAV	EAUP	PEAV	PAEU
TION	NEUF	FIAM	FIOM	NIOT	TIOM	TOIN
CHAN	TEUR	GHOM	GHAM	NACH	CHAM	CAHN
MEUR	TION	NAUP	NEUP	REUM	MEUP	MUER
LOIN	VEAU	TEIM	TOIM	OINL	LOIM	LION
CRAN	FRUI	GRUM	GRAM	NARC	CRAM	CARN
PROU	GAIN	FRAU	FROV	OUPR	PROV	PORU
FLAN	TEUR	PLOM	PLAM	ANFL	FLAM	FALN
FRUI	PEAU	PROJ	PRUJ	UIFR	FRUJ	FURI
NEUR	CHOI	MOUP	MEUP	FEUN	NEUP	NUEF
LOUR	MAIN	TOIP	TOUP	ROUL	LOUP	LUOR
GAIN	PLEU	QUIM	QAIM	NAIG	GAIM	GIAN
VEAU	BLIR	MEIV	MEAV	EAUV	VEAV	VAEU
CHOI	VEAU	GHOV	GHOJ	OICH	CHOJ	COHI
LION	QUAN	TOUM	TIOM	NIOL	LIOM	LOIN
BLIR	CHAN	PLOP	PLIP	RIBL	BLIP	BILR

**TABLEAU C.1** – *Tableau des stimuli-cible majuscules de longueur 4 et de leur distracteurs associés*

Stimulus-cible	Difficulté 1	Difficulté 2	Difficulté 3	Difficulté 4	Difficulté 5	Difficulté 6
SOU	AIR	ZAV	ZOV	SOV	OUS	SUO
PRO	ONE	BRA	BRO	PRA	PBO	POR
ANI	VER	OME	EMI	AIM	IMA	AIN
BLE	SUR	PLU	PLE	BLU	BLF	BEL
PLU	GRI	BLE	BLE	PLE	PLF	PUL
VEU	BOL	WAV	WEV	VEV	EUV	VUR
TRA	BLE	IRO	IRA	TRO	TBA	TAR
VRE	ANI	URA	URE	VRU	VBE	VER
SUR	BLE	ZAR	ZUP	SUP	RUS	SRU
PAR	NOU	BUR	BAP	PAP	RAP	PRA
FOR	PLU	TAR	TOP	FOP	ROF	FRO
MER	NOU	NAR	NEP	MEP	REM	MRE
TIR	VEU	FUR	FIP	TIP	RIT	TRI
VER	SAU	UIP	UEP	VEP	REV	VRE
MAI	PEU	NOJ	NAJ	MAJ	AIM	MIA
MAN	FOI	HOM	HAM	MAM	NAM	MNA
OUR	PEU	GAP	GUP	OUP	ROU	ORU
NOU	MER	MUV	MOV	NOV	OUN	NUO
AIR	SOU	RUF	RIF	AIF	RAI	ARI
PEU	GRI	FIV	FEV	PEV	EUP	PUE
FOI	QUI	TAJ	TOJ	FOJ	OIF	FIO
MOI	TRA	NUJ	NOJ	MOJ	OIM	MIO
QUI	ONE	GOJ	GUJ	QUJ	UIQ	QIU
AIN	PEU	VEM	VIM	AIM	NAI	ANI
UNE	FOI	AMI	AME	ENU	UME	UEN
POI	VRA	BAJ	BOJ	POJ	OIP	PIO
ONE	PRO	AMI	IME	OME	EMO	OEN
FOU	GLA	PEV	POV	FOV	OUF	FUO
VRA	POI	URY	URA	VRO	VPA	VAR
SAU	VRE	ZEV	ZAV	SAV	AUS	SUA
GLA	FOU	OLO	OLA	GLO	GEA	GAL
BUI	VAR	DEJ	DUJ	BUJ	UIB	BIU
VAR	BUI	WEP	WAP	VAP	RAV	VRA
BAI	GLE	DOJ	DAJ	BAJ	AIB	BIA
GLE	BAI	OLI	OLA	GLA	GLF	GEL
STA	FLE	ZTU	ZTA	STU	SPA	SAT
FLE	STA	PLO	PLE	FLU	FLF	FEL
DEL	OIR	BET	BEL	DET	LED	DLE
GRI	PLU	ORU	ORI	GRA	GBI	GIR
BOL	VEY	PAT	POT	BOT	LOB	BLO
NIL	DAR	MUT	MIT	NIT	LIN	NLI
LAC	FRI	TOG	TAG	LAG	CAL	LCA
FOL	GAN	PET	POT	FOT	LOF	FLO
TON	VRE	FEM	FOM	TOM	NOT	TNO
FRI	SAU	TRU	TRI	FRU	FPI	FIR
GAN	OUR	CEM	CAM	GAM	NAG	GNA
DAR	NIL	BOP	BAP	DAP	RAD	DRA
GUI	LAC	OIJ	OIJ	GUJ	UIG	GIU
REI	SAU	PIJ	PEJ	REJ	EIR	RIE

**TABLEAU C.2** – *Tableau des stimuli-cible majuscules de longueur 3 et de leur distracteurs associés*

Stimulus-cible	Difficulté 1	Difficulté 2	Difficulté 3	Difficulté 4	Difficulté 5	Difficulté 6
DE	LA	BF	DI	BE	ED	DF
LE	DU	TF	LA	TE	EL	LF
LA	DE	TR	LE	TA	AL	LR
DU	LE	BV	DO	BU	UD	DV
SE	LA	ZF	SU	ZE	ES	SF
SI	PA	ZJ	SA	ZI	IS	SJ
PA	SI	FR	SE	FA	AP	PR
MO	AN	NG	MI	NO	OM	MG
NI	CH	MJ	NO	MI	IN	NJ
AN	MO	RM	UN	RN	NA	AM
CH	NI	ON	CO	OH	HC	CN
ME	TI	NF	MA	NE	EM	MF
NE	AU	MF	NY	ME	EN	NF
TE	OI	FL	TI	FE	ET	TF
TI	ME	GF	TO	FI	IT	TJ
AU	NE	RV	EU	RU	UA	AV
OI	TE	GJ	AI	GI	IO	OJ
ON	IL	GM	EN	GN	NO	OM
IL	ON	JE	OL	JL	LI	IE
OU	RA	GV	AU	GU	UO	OV
RA	ET	PR	RI	PA	AR	RX
UN	ET	VM	EN	VN	NU	UM
CO	UN	GC	CA	GO	OC	CG
ET	OU	FI	IT	FT	TE	EI
EN	CO	FM	ON	FN	NE	EM
GR	BE	OP	GE	OR	RG	GP
SU	GE	ZV	SI	ZU	US	SV
BE	GR	PF	BO	PE	EB	BF
IR	GU	JP	UR	JR	RI	IP
GU	IR	OV	GA	OU	UG	GV
LU	JE	EV	LE	EU	UL	LV
JE	LU	TF	JI	TE	EJ	JF
GI	NA	OJ	GO	OI	IG	GJ
NA	GI	MR	NU	MA	AN	NR
BE	UI	DF	BA	DE	EB	BF
UI	BE	VJ	EI	VI	IU	UJ
IO	AS	VQ	IA	VO	OI	IQ
IA	GO	VR	IO	VA	AI	IR
GO	IA	QG	GE	QO	OG	GQ
AS	IO	RZ	IS	RQ	SA	AZ
FU	NI	EV	FO	EU	UF	FV
NI	FU	MJ	NU	MI	IN	NJ
SO	MU	ZQ	SA	ZO	OS	SQ
MU	SO	NV	ME	NU	UM	MV
AL	VE	RE	IL	RL	LA	AE
VE	OS	UF	VO	UE	EV	VF
OS	AL	QZ	US	QS	SO	OZ
GE	SU	OF	GA	OE	EG	GF

**TABLEAU C.3** – *Tableau des stimuli-cible majuscules de longueur 2 et de leur distracteurs associés*

Stimulus-cible	Difficulté 1	Difficulté 2	Difficulté 3	Difficulté 4	Difficulté 5	Difficulté 6
seul	main	zout	zeut	leus	seut	suel
main	seul	woim	waim	naim	maim	mian
pleu	main	blav	blev	eupl	plev	pelu
quan	lion	guim	guam	naqu	quam	qaun
teur	tion	feif	feuf	ruet	teuf	tuer
pour	choi	beauf	bouf	roup	poub	puor
peau	chan	beiv	beav	eaup	peav	paeu
tion	neuf	fiam	fiom	niot	tiom	toin
chan	teur	ehom	eham	nach	cham	cahn
meur	tion	nauf	neuf	reum	meup	muer
loin	veau	teim	toim	oinl	loim	lion
cran	frui	erum	eram	narc	cram	carn
prou	gain	brau	brov	oupr	prov	poru
flan	teur	tlom	tlam	anfl	flam	faln
frui	peau	troj	truj	uifr	fruj	furi
neuf	choi	mout	meut	feun	neut	nuef
lour	main	toif	touf	roul	loup	luor
gain	pleu	quim	qaim	naig	gaim	gian
veau	blir	meiv	meav	eauv	veav	vaeu
choi	veau	ehou	ehoj	oich	choj	cohi
lion	quan	toum	tiom	niol	liom	loin
blir	chan	plof	plif	ribl	blip	bilr

TABLEAU C.4 – Tableau des stimuli-cible minuscules de longueur 4 et de leur distracteurs associés

Stimulus-cible	Difficulté 1	Difficulté 2	Difficulté 3	Difficulté 4	Difficulté 5	Difficulté 6
sou	air	zav	zov	sov	ous	suo
pro	one	bra	bro	pra	pno	por
ani	ver	ome	emi	aim	ima	ain
ble	sur	plu	ple	blu	elb	bel
plu	gri	ble	blu	ple	ulp	pul
veu	bol	wav	wev	vev	euv	vue
tra	ble	fro	fra	tro	art	tar
vre	ani	ura	ure	vru	erv	ver
sur	ble	zar	zup	sup	rus	sru
par	nou	bur	bap	pap	rap	pra
for	plu	tar	top	fop	rof	fro
mer	nou	nar	nep	mep	rem	mre
tir	veu	fur	fin	tin	rit	tri
ver	sau	uip	uep	vep	rev	vre
mai	peu	noj	naj	maj	aim	mia
man	foi	hom	ham	mam	nam	mna
our	peu	cap	cup	oup	rou	oru
nou	mer	muv	mov	nov	oun	nuo
air	sou	ruf	rif	aif	rai	ari
peu	gri	fiv	fev	pev	eup	pue
foi	qui	taj	toj	foj	oif	fio
moi	tra	nuj	noj	moj	oim	mio
qui	one	goj	guj	quj	uiq	qiu
ain	peu	vem	vim	aim	nai	ani
une	foi	ami	ame	enu	ume	uen
poi	vra	baj	boj	poj	oip	pio
one	pro	ami	ime	ome	emo	oen
fou	gla	pev	pov	fov	ouf	fuo
vra	poi	ury	ura	vro	vpa	var
sau	vre	zev	zav	sav	aus	sua
gla	fou	qlo	qla	glo	gea	gal
bui	var	dej	duj	buj	uib	biu
var	bui	wef	waf	vap	rav	vra
bai	gle	doj	daj	baj	aib	bia
gle	bai	qli	qla	gla	elg	gel
sta	fle	ztu	zta	stu	ast	sat
fle	sta	tlo	tle	flu	lef	fel
del	oir	bet	bel	det	led	dle
gri	plu	qru	qri	gra	irg	gir
bol	vey	pat	pot	bot	lob	blo
oir	del	cat	cit	oit	roi	ori
nil	dar	mut	mit	nit	lin	nli
lac	fri	tos	tas	las	cal	lca
fol	gan	let	lot	fot	lof	flo
ton	vre	fem	fom	tom	not	tno
fri	sau	tru	tri	fru	rif	fir
gan	our	cem	cam	gam	nag	gna
dar	nil	bof	baf	daf	rad	dra
gui	lac	qij	quj	guj	uig	giu
rei	sau	fij	fej	rej	eir	rie

TABLEAU C.5 – Tableau des stimuli-cible minuscules de longueur 3 et de leur distracteurs associés

Stimulus-cible	Difficulté 1	Difficulté 2	Difficulté 3	Difficulté 4	Difficulté 5	Difficulté 6
de	la	ha	di	he	ed	dt
le	du	fa	la	fe	el	la
la	di	fe	le	fa	al	le
du	le	bv	do	bu	ud	dv
se	lo	za	su	ze	es	sa
si	pa	zj	sa	zi	is	sj
pa	si	be	po	ba	ap	pe
mo	an	ne	mi	no	om	me
ni	ch	mj	no	mi	in	nj
an	mo	em	un	en	na	am
ch	ni	ok	co	oh	hc	ck
me	ti	na	mu	ne	em	ma
ne	au	mf	ny	me	en	nf
te	oi	fa	ti	fe	et	ta
ti	me	fj	to	fi	it	tj
au	ne	rv	ou	eu	ua	av
oi	te	cj	ai	ci	io	oj
on	il	cm	en	cn	no	om
il	on	it	ol	jl	li	it
ou	ra	cv	au	cu	uo	ov
ra	et	fe	ri	fa	ar	re
un	et	vm	en	vn	nu	um
co	un	se	ca	so	oc	ce
et	ou	ft	it	at	te	ef
en	co	am	on	an	ne	em
gr	be	qn	ge	or	rg	gn
su	ge	zv	si	zu	us	sv
be	gr	ha	bo	he	eb	ba
ir	gu	jn	ur	jr	ri	in
gu	ir	ov	ga	ou	ug	gv
lu	je	jv	lo	ju	ul	lv
je	lu	la	ji	le	ej	ja
gi	na	qj	go	qi	ig	gj
na	gi	me	nu	ma	an	ne
be	ui	pa	bi	pe	eb	ba
ui	be	vj	ei	vi	iu	uj
io	as	jc	ia	jo	oi	ic
ia	go	je	io	ja	ai	ie
go	ia	qc	gu	qo	og	gc
as	io	ez	is	es	sa	az
fu	ni	tv	fo	tu	uf	fv
ni	fu	mj	nu	mi	in	nj
so	mu	zc	sa	zo	os	sc
mu	so	nv	me	nu	um	mv
al	ve	et	il	el	la	at
ve	os	vf	vo	ue	ev	va
os	al	cz	us	cs	so	oz
ge	su	qa	ga	qe	eg	ga

**TABLEAU C.6** – *Tableau des stimuli-cible minuscules de longueur 2 et de leur distracteurs associés*

## Annexe D

# Tests utilisés lors des évaluations pré et post-entraînement

**TABLEAU D.1** – *Tests utilisés lors des évaluations pré et post-entraînements en passation collective.*

Dimension évaluée	Test	Exemple
Vocabulaire	Désigner l'image (parmi 4) correspondant au mot énoncé	Hibou dans Hibou, aigle, pie, pingouin
Compréhension syntaxique	Entourer l'image (parmi 4) correspondant à la phrase énoncée	Le chat est sur la table (sous, à côté, derrière)
Conscience phonologique	Comptage syllabique Jugement de rimes Jugement de similarité Intrus phonologique Positionner le phonème	chat, papillon selle pelle terre commence comme bateau : chapeau, barreau, canot nid, nœud, main, noix /o/ dans potiron

**TABLEAU D.2** – *Tests utilisés lors des évaluations pré et post-entraînements en passation individuelle.*

Dimension évaluée	Test	Exemple
Connaissance des lettres	Nom des lettres	20 lettres
	Son des lettres	12 lettres
Dénomination rapide	Dénomination de chiffres et d'objets	5 chiffres ou objets répétés 10x
Lecture	Lecture du mots	En 2 min
Langage oral	Lecture de pseudo-mots	En 2 min
	Répétition de mots Répétition de pseudo-mots	sure, crocodile, escargot scralon, dermolin
Conscience phonémique	Fusion de phonèmes	/f/-/o/ -> /fo/
	Enlever le premier son	Soleil -> oeil
Empan visuo-attentionnel	Tâche de report global	Report oral sur 20 essais
	Tâche de report partiel	Report 10 cibles par position
	Seuil de chiffre	Temps minimal de reconnaissance
Anglais	Compréhension orale	Désignation d'image
	Production orale	A partir d'images

## Annexe E

# Coefficients des modèles multi-niveaux utilisés pour analyser les données d'entraînement d'Evasion

**TABLEAU E.1** – Coefficients du modèle 0 expliquant la variabilité du score d'empan visuo-attentionnel par la temporalité du test et le jeu utilisé à l'entraînement.

Modèle 0 : score $\sim 1 + \text{prePost} + \text{prePost}*\text{jeu}$				
Variable	Valeur estimée	$p$	$CI_{inf}$	$CI_{sup}$
Intercept	-0.009	0.9	-0.15	0.13
Pre-Post	0.30	<0.001	0.15	0.44
Pre-Post*Jeu (ref : Luciole)	0.06	0.51	-0.13	0.27

**TABLEAU E.2** – Coefficients du modèle Pr expliquant la variabilité du score d'empan visuo-attentionnel par la temporalité du test et la qualité du suivi du protocole.

Modèle Pr : score $\sim 1 + \text{prePost} + \text{prePost}*G_{\text{suiviProtocole}}$				
Variable	Valeur estimée	$p$	$CI_{inf}$	$CI_{sup}$
Intercept	-0.06	0.58	-0.27	0.15
Pre-Post	0.36	0.007	0.09	0.64
Pre-Post* $G_{\text{neutre}}$ (ref : $G_{\text{insuffisant}}$ )	-0.05	0.78	-0.44	0.33
Pre-Post* $G_{\text{bon suivi}}$ (ref : $G_{\text{insuffisant}}$ )	-0.0026	0.99	-0.40	0.39

**TABLEAU E.3** – Coefficients du modèle M expliquant la variabilité du score d'empan visuo-attentionnel par la temporalité du test et la semaine de démotivation perçue des élèves.

Modèle M : score $\sim 1 + \text{prePost} + \text{prePost}*Semaine$				
Variable	Valeur estimée	$p$	$CI_{inf}$	$CI_{sup}$
Intercept	-0.30	0.37	-0.97	0.37
Pre-Post	0.27	0.32	-0.27	0.82
Pre-Post*Semaine	0.01	0.72	-0.07	0.12

**TABLEAU E.4** – Coefficients du modèle  $T$  expliquant la variabilité du score d'empan visuo-attentionnel par la temporalité du test et la durée totale d'entraînement.

Modèle T : score $\sim 1 + \text{prePost} + \text{prePost} * T_{total}$				
Variable	Valeur estimée	$p$	$CI_{inf}$	$CI_{sup}$
Intercept	0.01	0.86	-0.14	0.17
Pre-Post	0.30	<0.001	0.16	0.45
Pre-Post* $T_{total}$	0.13	0.01	0.02	0.24

**TABLEAU E.5** – Coefficients du modèle  $T1$  expliquant la variabilité du score d'empan visuo-attentionnel par la temporalité du test et le temps passé sur chacun des mini-jeux d'Evasion ( $t1$  : durée passée sur l'Attrape-Lettre,  $t2$  : durée passée sur la Forêt en  $T$ ,  $t3$  : durée passée sur la Tour des Lettres,  $t4$  : durée passée sur l'Omelette).

Modèle T1 : score $\sim 1 + \text{prePost} + \text{prePost} * t1 + \text{prePost} * t2 + \text{prePost} * t3 + \text{prePost} * t4$				
Variable	Valeur estimée	$p$	$CI_{inf}$	$CI_{sup}$
Intercept	0.01	0.85	-0.14	0.17
Pre-Post	0.30	<0.001	0.16	0.45
Pre-Post*t1	0.13	<0.01	0.02	0.24
Pre-Post*t2	0.72	0.29	-0.06	0.20
Pre-Post*t3	0.07	0.26	-0.05	0.20
Pre-Post*t4	-0.09	0.15	-0.22	0.03

**TABLEAU E.6** – Coefficients estimés du modèle  $Reg$  expliquant la variabilité du score d'empan visuo-attentionnel par la temporalité du test et les régimes d'entraînement.

Modèle Reg : score $\sim 1 + \text{prePost} + \text{prePost} * \text{regime}$					
Variable	Valeur estimée	$p$	$CI_{inf}$	$CI_{sup}$	
Intercept	0.11	0.23	-0.07	0.28	
Pre-Post	0.22	0.009	0.05	0.38	
Pre-Post*Regime (ref : préférence A-L)	0.18	0.06	-0.01	0.39	

**TABLEAU E.7** – Coefficients estimés du modèle  $Reg +$  expliquant la variabilité du score d'empan visuo-attentionnel par la temporalité du test, les régimes d'entraînement et la durée totale d'entraînement.

Modèle Reg+ : score $\sim 1 + \text{prePost} + \text{prePost} * \text{regime} + \text{prePost} * T_{tot}$					
Variable	Valeur estimée	$p$	$CI_{inf}$	$CI_{sup}$	
Intercept	0.11	0.22	-0.07	0.30	
Pre-Post	0.23	0.006	0.06	0.39	
Pre-Post*Ttot	0.12	0.01	0.02	0.23	
Pre-Post*Regime (ref : préférence A-L)	0.17	0.09	-0.03	0.37	

**TABLEAU E.8** – Coefficients estimés des modèles J1 (respectivement J2, J3 et J4) expliquant l'évolution du niveau estimé K par l'avancement de l'entraînement au sein de l'Attrape-Lettre (respectivement, de la Forêt en T, de la Tour des Lettres et de l'Omelette)

Modèle J1 : score $\sim 1 + \text{debutFin}$				
Variable	Valeur estimée	$p$	$CI_{inf}$	$CI_{sup}$
Intercept	3.76	<0.001	3.66	3.86
Pre-Post	0.36	<0.001	0.24	0.47
Modèle J2 : score $\sim 1 + \text{debutFin}$				
Intercept	3.33	<0.001	3.15	3.47
Pre-Post	-0.07	0.35	-0.22	0.08
Modèle J3 : score $\sim 1 + \text{debutFin}$				
Intercept	3.77	<0.001	3.66	3.86
Pre-Post	0.22	<0.001	0.14	0.29
Modèle J4 : score $\sim 1 + \text{debutFin}$				
Intercept	2.92	<0.001	2.58	3.27
Pre-Post	1.36	<0.001	0.98	1.74

**TABLEAU E.9** – Coefficients estimés des modèles K1 (respectivement K2, K3 et K4) expliquant l'évolution du niveau K estimé par le profil du taux de réussite au sein de l'Attrape-Lettre (respectivement, de la Forêt en T, de la Tour des Lettres et de l'Omelette).

Modèle K1 : coeffK1 $\sim 1 + \text{parsevalGroupe}$				
Variable	Valeur estimée	$p$	$CI_{inf}$	$CI_{sup}$
Intercept	0.06	0.27	-0.05	0.18
$\text{parsevalGroupe}_2$	-0.07	0.5	-0.30	0.14
$\text{parsevalGroupe}_1$	-0.13	0.12	-0.30	0.03
Modèle K2 : coeffK2 $\sim 1 + \text{parsevalGroupe}$				
Intercept	0.09	0.10	-0.02	0.2
$\text{parsevalGroupe}_2$	-0.17	0.06	-0.36	0.012
$\text{parsevalGroupe}_1$	-0.25	0.03	-0.50	-0.01
Modèle K3 : coeffK3 $\sim 1 + \text{parsevalGroupe}$				
Intercept	0.34	<0.001	0.21	0.48
$\text{parsevalGroupe}_2$	-0.46	<0.001	-0.66	-0.27
$\text{parsevalGroupe}_1$	-0.55	<0.001	-0.73	-0.36
Modèle K4 : coeffK4 $\sim 1 + \text{parsevalGroupe}$				
Intercept	0.02	0.66	-0.08	0.13
$\text{parsevalGroupe}_2$	-0.06	0.58	-0.27	0.15
$\text{parsevalGroupe}_1$	-0.06	0.60	-0.27	0.16

**TABLEAU E.10** – Coefficients estimés du modèle  $K$  expliquant la variabilité du score d'empan visuo-attentionnel par l'évolution du niveau  $K$  estimé au sein de chaque mini-jeu ( $k_1$  : l'Attrape-Lettre,  $k_2$  : Forêt en T,  $k_3$  : la Tour des Lettres,  $k_4$  : l'Omelette).

Modèle K : score $\sim 1 + \text{prePost} + \text{prePost} * k_1 + \text{prePost} * k_2 + \text{prePost} * k_3 + \text{prePost} * k_4$				
Variable	Valeur estimée	$p$	$CI_{inf}$	$CI_{sup}$
Intercept	-0.015	0.83	-0.15	0.12
Pre-Post	0.31	<0.001	0.16	0.46
Pre-Post*K1	-0.009	0.86	-0.12	0.10
Pre-Post*K2	-0.009	0.85	-0.11	0.09
Pre-Post*K3	-0.01	0.75	-0.11	0.08
Pre-Post*K4	0.11	0.02	0.01	0.21

**TABLEAU E.11** – Coefficients estimés du modèle expliquant la variabilité du score d'empan visuo-attentionnel par des variables sélectionnées automatiquement.

Modèle K : score $\sim 1 + \text{prePost} + \text{prePost} * k_1 + \text{prePost} * k_2 + \text{prePost} * k_3 + \text{prePost} * k_4$				
Variable	Valeur estimée	$p$	$CI_{inf}$	$CI_{sup}$
Intercept	0.44	<0.001	0.18	0.69
Pre-Post	0.31	<0.001	0.21	0.41
<i>parsevalGroupe<sub>2</sub></i>	-0.35	0.002	-0.66	-0.04
<i>parsevalGroupe<sub>3</sub></i>	-0.60	<0.001	-0.89	-0.31
Pre-Post*t1	-0.11	0.02	0.01	0.20

## Annexe F

Taux de réussite moyen et nombre d'événements observés calculés pour chaque région des espaces de difficulté associés à la Forêt en T, à la Tour des Mots et à l'Omelette

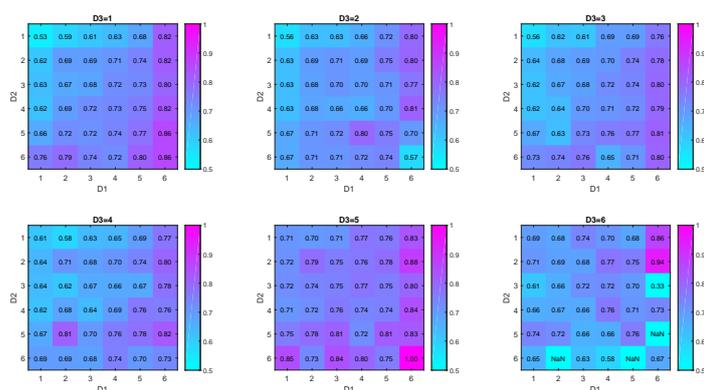
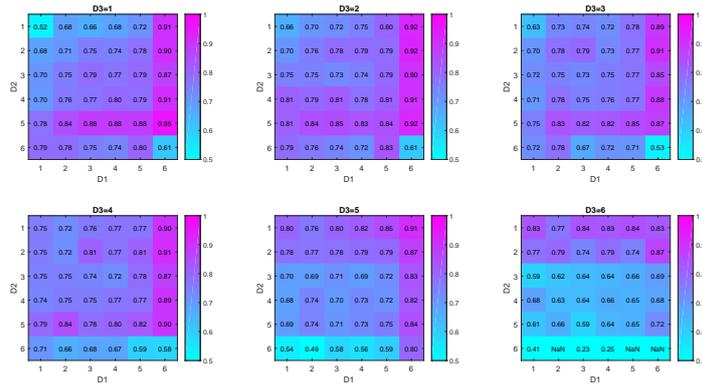
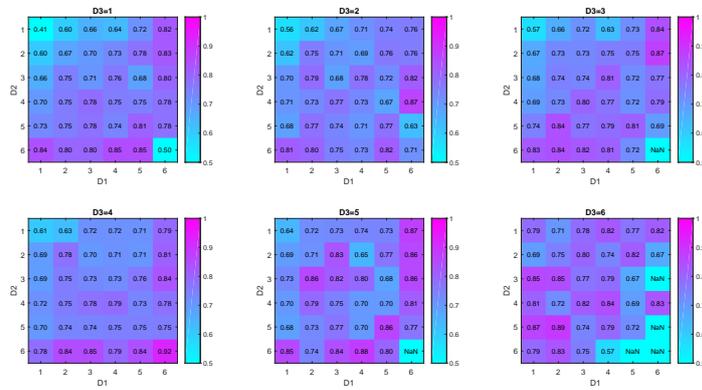


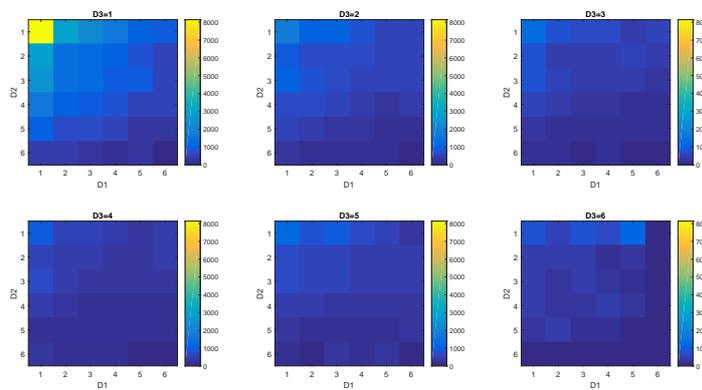
FIGURE F.1 – Taux de réussite moyen calculé pour chaque case de l'espace de difficulté associé à la Forêt en T. En abscisse,  $s$  la longueur des séquences, en ordonnée, la similarité visuelle cible/distracteur, et les sous-graphes 1 à 6 correspondent aux 6 valeurs liées au nombre et à la cadence de déplacement des fantômes.



**FIGURE F.2** – Taux de réussite moyen calculé pour chaque case de l'espace de difficulté associé à la Tour des Lettres. En abscisse, la longueur des séquences, en ordonnée, la similarité visuelle cible/distracteur, et les sous-graphes 1 à 6 correspondent aux 6 valeurs liées aux nombre de portes présentes à chaque étage.



**FIGURE F.3** – Taux de réussite moyen calculé pour chaque case de l'espace de difficulté associé à l'Omelette. En abscisse, la longueur des séquences, en ordonnée, la similarité visuelle cible/distracteur, et les sous-graphes 1 à 6 correspondent aux 6 valeurs liées au nombre d'œufs en mouvement dans le décor.



**FIGURE F.4** – Nombre de configuration proposées pour chaque région de l'espace de difficulté associé à la Forêt en T. Les axes sont les mêmes que ceux de la Figure F.1.

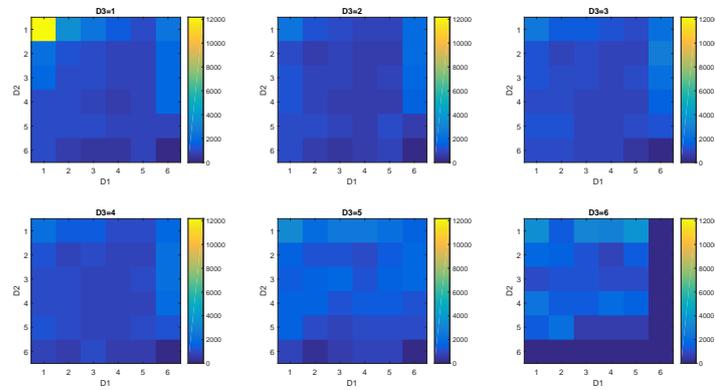


FIGURE F.5 – Nombre de configuration proposées pour chaque région de l'espace de difficulté associé à la Tour des Lettres. Les axes sont les mêmes que ceux de la Figure F.2.

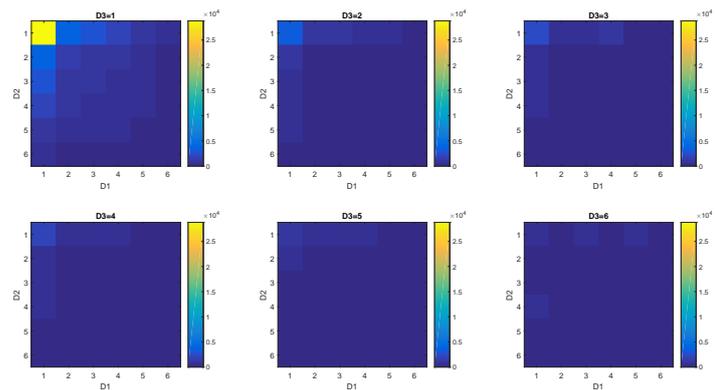


FIGURE F.6 – Nombre de configuration proposées pour chaque région de l'espace de difficulté associé à l'Omelette. Les axes sont les mêmes que ceux de la Figure F.3.