Le développement de la spatialisation en mémoire de travail

Morgane Ftaïta

▶ **To cite this version:**

Morgane Ftaïta. Le développement de la spatialisation en mémoire de travail. Psychologie. Université Côte d'Azur, 2025. Français. ⟨NNT : 2025COAZ2053⟩. ⟨tel-05555642⟩

HAL Id: tel-05555642

https://theses.hal.science/tel-05555642v1

Submitted on 17 Mar 2026

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

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

HAL Authorization

Le développement de la spatialisation en mémoire de travail

Morgane FTAÏTA

Laboratoire BCL : Bases, Corpus, Langage - UMR 7320 CNRS

Présentée en vue de l'obtention du grade de docteur en Psychologie
d'Université Côte d'Azur
Dirigée par : Fabien Mathy
Co-dirigée par : Alessandro Guida
Soutenue le : 05/12/2025

Devant le jury composé de :

Mostafa BOUANANI, Professeur, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah
Pom CHARRAS, MCF-HDR, Université de Montpellier Paul-Valéry
Maria Dolores DE HEVIA, Chargée de recherche CNRS, Université Paris Cité
Alessandro GUIDA, MCF, Université Rennes 2
Fabien MATHY, Professeur, Université Côte d'Azur
Catherine THEVENOT, Professeure, Université de Lausanne

Le développement de la spatialisation en mémoire de travail

Directeurs de thèse :
Fabien MATHY, Professeur, Université Côte d'Azur
Alessandro GUIDA, MCF, Université de Rennes 2

Président du jury :
Mostafa BOUANANI, Professeur, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah de Fès

Rapporteurs :
Pom CHARRAS, MCF-HDR, Université de Montpellier Paul-Valéry
Catherine THEVENOT, Professeure, Université de Lausanne

Examinateurs :
Mostafa BOUANANI, Professeur, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah de Fès
Maria Dolores DE HEVIA, Chargée de recherche CNRS, Université Paris Cité

Remerciements

Avant tout, je tiens à remercier chaleureusement Mostafa Bouanani, Pom Charras, Lola de Hevia et Catherine Thevenot, pour m'avoir fait l'honneur de faire partie de mon jury de thèse et pour le temps consacré à la lecture et à l'évaluation de ce travail.

Je remercie ensuite les personnes qui m'ont encadrée tout au long de mon parcours doctoral. Merci d'abord à toi, Michaël, pour ton accompagnement lors de ces premières années, pour tes retours encourageants et pour ta bonne humeur ! Un grand merci ensuite à mes deux directeurs de thèse, Alessandro Guida et Fabien Mathy, pour leur aide précieuse jusqu'aux derniers instants. Alessandro, la distance géographique a fait que nous n'avons pas eu l'occasion de beaucoup nous voir (oui, parce qu'il fait quand même froid chez vous, en Bretagne...), mais tu as toujours su m'accompagner durant ces quatre années. Merci à toi pour ces longs mails et ces échanges inspirants, tes retours toujours enthousiastes à l'idée d'une nouvelle expé et ta capacité à toujours trouver la petite faille expérimentale à contrôler (car, comme disait un grand sage : « De toutes façons, il y a des choix à faire, l'important c'est de bien réfléchir aux biais éventuels et de choisir en les ayant en tête »). Fabien, de ton côté, la distance géographique était telle que je pouvais toquer à dix reprises à ton bureau dans une même journée pour te poser toutes les questions possibles. D'un mini détail sur une manip à de longues relectures, merci d'avoir toujours su te rendre incroyablement disponible pour m'aiguiller. Merci pour toutes ces notes/post-it/schémas, pour tes retours méticuleux, pour ces innombrables conseils sur le plan scientifique et technique, mais aussi pour tous ces petits tips du quotidien ! Tous les deux, vous m'avez transmis le goût de la recherche et la fièvre des manipulations expérimentales. Merci enfin pour votre bienveillance sans faille.

Merci aux deux membres de mon comité de suivi de thèse, Sophie Portrat et Lucile Chanquoy, pour leurs conseils avisés, leurs retours constructifs concernant mes recherches, ainsi que pour leur guidance dans les différentes étapes de mon parcours.

Je remercie tous les membres du laboratoire Bases, Corpus, Langage pour leur accueil chaleureux, leur accompagnement tout au long de mon doctorat, ainsi que pour le soutien logistique et financier qui m'a permis de réaliser cette thèse dans les meilleures conditions qui soient. Merci à l'équipe d'ingénieurs, Pierre-Aurélien, Laurent, Denis et

Élisa, pour leur soutien technique, leur expertise et leurs conseils (notamment pour ces fameux bugs PsychoPy). Merci à l'équipe administrative du laboratoire, Caroline, Céline, mais surtout Anne-Marie et Odile. Merci à vous deux pour votre patience remarquable et votre aide précieuse dans la prise en main du trio infernal Étamine/-Goelett/Notilus. Odile, un merci tout particulier à toi, ta présence au labo a été un vrai repère pour moi (grâce à ta sonnerie de téléphone, j'avais mon quota d'au moins un chant corse par jour) ! Merci également aux enseignants-chercheurs et professeurs dont j'ai croisé la route : merci à Fanny, Lucile et Émilie pour vos conseils sur l'avenir (toujours aussi terrifiant) après le doctorat. Merci à Shona, Katerina et Amanda pour votre bonne humeur constante. Merci à Philippe pour ces chants inopinés qu'on entendait depuis le couloir (l'oscar de la meilleure imitation de Tino Rossi te revient de droit). À toutes ces autres personnes que je n'aurai pas la place de citer ici, merci d'avoir fait de ce lieu de travail un espace convivial et agréable.

Je tiens ensuite à remercier toutes celles et ceux qui ont contribué à la réalisation de mes travaux de recherche. En premier lieu, je remercie les étudiantes de Master et les stagiaires qui ont participé à la collecte des données : merci à Marie Binet, Lara Guélé, Ilham Hourra, Julie Cayron et Morgane Fauché pour votre implication et votre rigueur. Je remercie également Émilie Banks pour son aide dans l'élaboration du script initial d'analyse et de la première version de la tâche PsychoPy. Merci également aux étudiants de L3 ayant participé au Travail d'Étude et de Recherche 2023/2024, qui ont rendu possible la collecte des données de l'Expérience 4.

En second lieu, un grand merci aux directeurs et directrices des établissements scolaires qui m'ont accueillie. Un merci particulier à Thomas, Frédérique et Karyn pour leur bienveillance, leur intérêt à l'égard de mes travaux et pour l'aide qu'ils m'ont apportée sur le terrain. Je remercie également tous les professeurs des écoles pour leur disponibilité et pour avoir toujours fait en sorte de concilier leurs plannings chargés avec le déroulement de mes passations.

Je remercie tous les parents d'élèves pour leur accord et pour leur confiance. Et bien entendu, merci à tous les enfants que j'ai eu l'occasion de rencontrer au cours de ces quatre années. Merci pour votre insouciance, votre curiosité et votre enthousiasme durant toutes ces séances. Merci aussi pour vos sourires, vos lettres, vos dessins et toutes vos petites attentions. Vous avez fait en sorte de rendre mon expérience sur le terrain inoubliable, et il me tarde d'y retourner pour de nouvelles aventures (avec, qui sait, un nouvel astronaute à vous présenter). Merci enfin à tous les participants adultes qui ont pris part à mes études, merci pour votre intérêt et pour avoir eu la patience de mémoriser tous ces fruits !

Parce que mon parcours doctoral n'était pas seulement consacré à la recherche, mais aussi à l'enseignement, j'adresse mes remerciements à tous les membres du département

de Psychologie de l'Université Côte d'Azur, ainsi qu'aux équipes du campus Carlone. Passer de l'autre côté du miroir en rejoignant l'équipe enseignante m'a donné l'occasion de mesurer l'ampleur du travail accompli par le personnel RH et administratif, que je salue chaleureusement pour leur aide constante. Merci également aux membres du PC sécurité, vos mots chaleureux et vos blagues quotidiennes m'ont permis de commencer chaque cours avec le sourire aux lèvres !

Ce doctorat a aussi été l'occasion pour moi de tisser des liens avec des personnes formidables. Raphaël, merci pour tes mots et tes encouragements, surtout dans les derniers instants. Nico, Chris, vous êtes des personnes tellement solaires et généreuses, j'ai de la chance d'avoir croisé votre route. Clémentine, si tu savais à quel point tes petites irruptions dans notre bureau me manquent. Merci à toi pour ces fous rires, ces « eurêka » lors de nos blind tests et ces plateaux de fromages ! Merci à la grande équipe des doctos de BCL, et en particulier Sam, Furkan, Farah, Giulio et Anaïs, cette aventure n'aurait pas été la même sans vous ! Mar, ces mots ne seront jamais suffisants pour te dire à quel point tu me manques et à quel point je te suis reconnaissante. Merci pour tous ces instants que nous avons passés ensemble, de mon premier pas au labo à ce dernier « adios » devant le tram. Merci pour ton rire éclatant, ta sensibilité et ta capacité à toujours être là pour les autres, toutes ces petites choses qui font de toi une personne exceptionnelle.

Maëliss, il est évident que les larmes ont coulé en écrivant ces phrases. Je me rappelle nos premiers instants dans le bureau de Patricia, à tenter de résoudre des soucis de planning pour nos cours, on a partagé ce regard qui disait « mais dans quoi on s'est embarquées ». On a commencé cette aventure ensemble, sans trop savoir où on allait, et tu n'imagines pas à quel point t'avoir à mes côtés lors de ces quatre années a été un véritable soutien. C'est avec toi que j'ai partagé mes larmes et mes doutes, et tu as toujours été là pour me redonner la force de continuer et me convaincre de ne pas passer cette thèse *out the windoooow*. Merci pour tous ces moments qu'on a partagés et qui resteront gravés dans ma mémoire : ces petites escapades quotidiennes à Lidl en quête de la fameuse cookie dough, ces longues journées d'expés dans les salles glaciales de Carlone, ces moments à être mi-stressées, mi-contentes et re mi-stressées derrière, ces paquets de chips et ces fous rires à en pleurer. Tu me connais, j'ai eu du mal à choisir parmi les mille et une choses que je souhaitais te dire, il y aurait tant à écrire encore. Le soleil de Nice va perdre de sa lumière lorsque tu t'en iras (revoir ta chèèère Bretagne !), mais ce n'est évidemment qu'un très court au revoir (on a une tournée de restos indiens à continuer tout de même).

Mes remerciements vont enfin à tous mes proches pour leur soutien indéfectible. Megh, merci d'être la preuve que la famille va bien au-delà des liens du sang, et merci d'avoir toujours cru en moi, parfois bien plus que je n'ai su croire en moi-même. Merci

aussi à Camille et Cassy d'être des amies si précieuses. Merci aussi à Flo, Andréa, Morgane et Lolita pour tous ces moments passés ensemble (même si vous ne m'avez pas beaucoup vue ces derniers temps). Merci à Thomas, Franck et Thierry : si l'on dit que la musique adoucit les mœurs, j'ajouterais que le rock, lui, adoucit le doctorat ! Merci à ma belle-famille, Chantal, Georges, Cécile, et bien sûr, ma petite Maëly, que je vois grandir et qui m'épate un peu plus chaque jour.

Papa, depuis toute petite, je m'amusais à mettre mes pieds dans tes grandes chaussures et à marcher avec. La métaphore n'a jamais été aussi exacte qu'aujourd'hui. À la fac et bien au-delà, tu continues à être mon repère à chaque instant, merci d'être toujours là pour ta (plus si petite) fille. Maman, merci d'avoir relu cette thèse avec tant d'intérêt et de patience, et merci pour tes messages de soutien quotidiens lors de cette dernière ligne droite ! Merci surtout d'avoir forgé la personne que je suis aujourd'hui, passionnée de musique et de nature, et surtout, merci pour ton amour inconditionnel. Lulu, le temps file si vite que je ne sais où sont passées ces deux petites filles qui jouaient ensemble dans leur chambre avenue Durante. Sache que je serai toujours fière de toi et toujours là pour te soutenir et te guider, même si ces derniers temps, c'est plutôt la petite sœur qui a réconforté la grande !

Mamie, mi saria piaciutu pudè dì ti què, eccu, aghju finalmente finitu i mo studii, dopu à tutte quelle volte chì m'hai dumandatu. A vita hà sfurtunatamente decisu altrimente. Grazie per avè fattu di a Corsica u mo rifugiu, ancu s'ella hè assai viota senza tè avà. Fermerai in u mo core per sempre.

Merci enfin à toi, Nicolas, d'être l'homme que tu es, généreux, attentionné, incroyablement drôle et toujours là pour me faire oublier les peines de la vie. Il est clair que je n'aurais pas traversé ce doctorat de la même manière sans toi à mes côtés. Merci de faire de notre maison un véritable foyer, avec tous ces projets de bricolage, ces petits plats et ces nombreuses, trèèès nombreuses décorations de Noël. Pour ces raisons, et pour tout le reste, je t'aime (enfin, juste un petit peu).

Résumé

La *spatialisation* peut être définie comme l'ajout par le système cognitif d'une composante spatiale en mémoire à une information initialement non spatiale. Lors de tâches de mémoire à court terme ou de travail, la spatialisation tend à être recrutée de manière implicite pour coder l'ordre d'une série d'informations verbales. L'effet SPoARC (*Spatial-Positional Association of Response Codes*) constitue un indicateur comportemental de cet encodage spatial : la récupération d'items maintenus en mémoire de travail génère des réponses directionnelles, dont l'orientation dépend de la position de l'élément dans la séquence considérée. Chez des individus occidentaux, les premiers éléments d'une séquence sont par exemple plus rapidement reconnus de la main gauche, tandis que la récupération d'items plus tardifs donne lieu à des réponses plus rapides de la main droite. Ces données suggèrent que le traitement de l'ordre sériel en mémoire de travail s'appuie spontanément sur une ligne mentale horizontale, dont l'orientation semble être liée aux habitudes de lecture et d'écriture. Le recrutement spontané d'une ligne mentale gauche-droite dans la mémorisation de l'ordre sériel a été largement documenté chez l'adulte, permettant de généraliser l'effet SPoARC à de multiples contextes expérimentaux. À l'inverse, peu d'études avaient encore évalué la présence de ce phénomène chez l'enfant. Cette thèse visait à examiner la trajectoire développementale de la spatialisation, en recourant à deux types de protocoles : des tâches simples de transposition spatiale d'un élément, adaptées à l'enfant dès l'âge préscolaire ; et des tâches plus complexes mesurant les temps de réaction à plusieurs items mémorisés, administrées à des enfants d'âge scolaire. Dans ces protocoles respectifs, les participants devaient mémoriser des informations ordinales en l'absence de toute labellisation alphanumérique dans la tâche simple ; et sans facilitation visuelle ni consigne de rappel explicite de l'ordre dans la tâche complexe. Dans nos résultats, une forme élémentaire de spatialisation gauche-droite lors du rappel d'un élément sur un axe horizontal tangible est apparue vers l'âge de quatre ans, et une forme plus complexe de spatialisation lors de la mémorisation de plusieurs items a pu être détectée à partir de huit ans. Nous montrons que la spatialisation semble être liée à de plus faibles capacités en mémoire de travail verbale chez l'enfant d'âge scolaire, suggérant que ce mécanisme pourrait être recruté dans le but de compenser des difficultés mnésiques. Des études menées dans le cadre d'un apprentissage répété ont également permis d'esquisser la dynamique de la spatialisation pendant la consolidation, et de questionner sa possible implication dans l'apprentissage sériel ; bien que des résultats disparates entre enfants et adultes appellent à de futures investigations reposant sur des protocoles plus robustes. Nous ouvrons cette thèse sur des pistes expérimentales susceptibles de mieux éprouver nos résultats, dans l'optique de favoriser la détection du SPoARC chez l'enfant et d'en préciser les facteurs développementaux.

Mots Clés : Spatialisation, Effet SPoARC, Mémoire de travail, Développement, Langage écrit

Abstract

Spatialization refers to the addition by the cognitive system of a spatial component to initially non-spatial information held in memory. Spatialization appears to be implicitly recruited to map the order of verbal items during short-term and working memory tasks. The SPoARC (Spatial-Positional Association of Response Codes) is a behavioral signature of this spatial encoding : retrieving items in working memory results in directional responses, which vary according to the item's position in the memorized sequence. In Westerners, early items tend to elicit faster response times with the left hand, whereas late items are responded to more quickly using the right hand. This finding suggests that serial order in working memory is coded onto a horizontal mental line, whose orientation aligns with reading and writing habits. The representation of serial order along a left-to-right mental line has been widely reported in adults, allowing the generalization of the SPoARC to various experimental settings. Conversely, few studies have yet assessed the presence of this phenomenon in children. The present dissertation sought to examine the development of spatialization using two types of protocols. The first protocol involved single-item spatial transposition tasks, implemented with children as young as preschool age. The second protocol entailed more complex tasks assessing response times to multiple memorized items in school-aged children. In these respective protocols, participants had to memorize ordinal information which was neither labeled nor verbalized alphanumerically in the simple task ; and in the absence of any visual facilitation or instructions to reproduce the serial order in the complex task. In our results, a rudimentary left-to-right spatialization when recalling an item on a tangible axis appeared around the age of four, and a more complex form of spatialization when memorizing several items could be detected from the age of eight. We also show that spatialization appears to be linked to weaker verbal working memory capacities in school-aged children, implying that the mechanism might be recruited to offset memory limitations. Repeated-learning studies have also provided initial insight into the dynamics of spatialization during consolidation and its possible contribution to serial learning, although divergent findings between children and adults underscore the necessity of future investigations with more robust experimental designs. We further outline experimental avenues to more rigorously assess our findings, aiming to optimize SPoARC detection in children and to clarify its developmental factors.

Key Words : Spatialization, SPoARC Effect, Working Memory, Development, Written Language

Table des matières

Introduction **1**

1 Cadre théorique **5**

1.1 Genèse des études sur l'effet SPoARC 6

1.2 Hypothèse du tableau blanc mental 11

1.3 Généralisation de l'effet SPoARC 14

1.4 De l'inné au culturel : le façonnement de la spatialisation 22

1.5 Théorie de l'expertise et développement de l'effet SPoARC 30

1.6 Présentation des chapitres expérimentaux 37

2 Spatialisation élémentaire de l'information ordinale **41**

2.1 Introduction 42

2.2 Expérience 1 47

2.2.1 Objectif 47

2.2.2 Méthode 48

2.2.2.1 Participants 48

2.2.2.2 Matériel 49

2.2.2.3 Procédure 50

2.2.3 Résultats 52

2.2.3.1 Analyse groupée 53

2.2.3.2 Analyse dégroupée 56

2.2.4 Discussion 57

2.3 Expérience 2 62

2.3.1 Objectif 62

2.3.2 Méthode 63

2.3.2.1 Participants . . . 63
2.3.2.2 Matériel . . . 64
2.3.2.3 Procédure . . . 64
2.3.3 Résultats . . . 66
2.3.4 Discussion . . . 69
2.4 Expérience 3 . . . 71
2.4.1 Objectif . . . 71
2.4.2 Méthode . . . 71
2.4.2.1 Participants . . . 71
2.4.2.2 Matériel et procédure . . . 71
2.4.3 Résultats . . . 73
2.4.4 Discussion . . . 77
2.5 Expérience 4 . . . 80
2.5.1 Objectif . . . 80
2.5.2 Méthode . . . 81
2.5.2.1 Participants . . . 81
2.5.2.2 Matériel . . . 82
2.5.2.3 Procédure . . . 82
2.5.3 Résultats . . . 85
2.5.3.1 Comparaison entre conditions . . . 85
2.5.3.2 Comparaison avec les expériences précédentes . . . 91
2.5.4 Discussion . . . 94
2.6 Discussion générale intermédiaire . . . 97

3 Effet SPoARC chez l'enfant 101

3.1 Introduction . . . 102
3.2 Expérience 5 . . . 103
3.2.1 Objectif . . . 103
3.2.2 Méthode . . . 109
3.2.2.1 Participants . . . 109

3.2.2.2 Matériel . . . 110
3.2.2.3 Procédure . . . 113
3.2.3 Résultats . . . 115
3.2.3.1 Analyses préliminaires . . . 115
3.2.3.2 Effet de spatialisation : ANOVA . . . 117
3.2.3.3 Effet de spatialisation : Modèles linéaires mixtes généralisés . . . 118
3.2.3.4 Effet de spatialisation : régression linéaire . . . 124
3.2.3.5 Bootstrap et analyse log-linéaire . . . 126
3.2.4 Discussion . . . 130
3.3 Expérience 6 . . . 134
3.3.1 Objectif . . . 134
3.3.2 Méthode . . . 136
3.3.2.1 Participants . . . 136
3.3.2.2 Tâche de spatialisation . . . 137
3.3.2.3 Mesures complémentaires . . . 139
3.3.3 Résultats . . . 142
3.3.3.1 Analyses préliminaires . . . 142
3.3.3.2 Effet de spatialisation : Modèles linéaires mixtes généralisés . . . 143
3.3.3.3 Effet de spatialisation : régression linéaire . . . 147
3.3.3.4 Effet de spatialisation : Bootstrap . . . 151
3.3.3.5 Spatialisation et mesures complémentaires . . . 153
3.3.4 Discussion . . . 158
3.4 Expérience 7 . . . 161
3.4.1 Objectif . . . 161
3.4.2 Méthode . . . 162
3.4.2.1 Participants . . . 162
3.4.2.2 Matériel et procédure . . . 162
3.4.3 Résultats . . . 164

3.4.3.1 Analyses préliminaires 164
3.4.3.2 Effet de spatialisation : Modèles mixtes linéaires généralisés 165
3.4.3.3 Effet de spatialisation par régression linéaire 166
3.4.3.4 Effet de spatialisation : Bootstrap 167
3.4.3.5 Spatialisation et mesures complémentaires 169
3.4.4 Discussion 176
3.5 Discussion générale intermédiaire 181

4 Effet SPoARC et apprentissage répété 187

4.1 Introduction 188
4.2 Expérience 8 195
4.2.1 Objectif 195
4.2.2 Méthode 195
4.2.2.1 Participants 195
4.2.2.2 Matériel 196
4.2.2.3 Procédure 197
4.2.3 Résultats 199
4.2.4 Analyse préliminaire 199
4.2.4.1 Effet de spatialisation : Modèles linéaires mixtes généralisés 202
4.2.4.2 Effet de spatialisation : régression linéaire 203
4.2.4.3 Analyse exploratoire : découpage par sous-blocs 204
4.2.4.4 Comparaison avec des données non-répétées 207
4.2.4.5 Spatialisation et apprentissage 210
4.2.5 Discussion 213
4.3 Expérience 9 217
4.3.1 Objectif 217
4.3.2 Méthode 218
4.3.2.1 Participants 218
4.3.2.2 Matériel 218

4.3.2.3 Procédure . . . 219
4.3.3 Résultats . . . 220
4.3.3.1 Analyses préliminaires . . . 220
4.3.3.2 Effet de spatialisation : Modèles mixtes linéaires généralisés . . . 222
4.3.3.3 Effet de spatialisation par régression linéaire . . . 223
4.3.3.4 Analyse exploratoire : découpage par sous-blocs . . . 223
4.3.3.5 Comparaison avec des données non-répétées . . . 225
4.3.3.6 Spatialisation et apprentissage . . . 226
4.3.4 Discussion . . . 226
4.4 Expérience 10 . . . 232
4.4.1 Objectif . . . 232
4.4.2 Méthode . . . 232
4.4.2.1 Participants . . . 232
4.4.2.2 Matériel . . . 233
4.4.2.3 Procédure . . . 233
4.4.3 Résultats . . . 234
4.4.3.1 Analyses préliminaires . . . 234
4.4.3.2 Effet de spatialisation : Modèles mixtes linéaires généralisés . . . 235
4.4.3.3 Effet de spatialisation par régression linéaire . . . 236
4.4.3.4 Analyse exploratoire : découpage par sous-blocs . . . 238
4.4.3.5 Spatialisation et apprentissage . . . 240
4.4.4 Discussion . . . 240
4.5 Discussion générale intermédiaire . . . 243

5 Discussion générale et conclusion 251

5.1 Synthèse des résultats . . . 252
5.2 Apports, limites et ouvertures . . . 256
5.2.1 Développement de la spatialisation de l'ordre sériel . . . 256
5.2.2 Spatialisation et apprentissage répété . . . 261

5.3 Perspectives 264
5.3.1 Optimisation de la détection de la spatialisation chez l'enfant . . 264
5.3.2 Étude du lien entre spatialisation et apprentissage 267
5.4 Conclusion 269

Références **271**

Crédits **299**

Table des figures **309**

Liste des tableaux **316**

A Matériel supplémentaire du Chapitre 1 **317**

B Matériel supplémentaire du Chapitre 2 **321**

C Matériel supplémentaire du Chapitre 3 **341**

D Matériel supplémentaire du Chapitre 4 **369**

Introduction

« . . . A présent, je me rends dans la salle de bain, j'ouvre le tiroir où se trouve ma serviette et j'y trouve un as de carreau. Une dame de cœur est posée sur le rebord du lavabo, près de mon rasoir. Je trouve un sept de pique devant la mousse à raser. J'ouvre ensuite le robinet duquel coule un valet... ». Voilà une routine matinale des plus particulières pour Roger, qui semble s'apprêter avant d'amorcer une énième journée de travail. Pourtant, il est dix heures du soir et le jeune homme demeure assis dans le fauteuil de sa salle à manger. Il parcourt en réalité mentalement la salle de bain de sa résidence secondaire, un lieu qu'il connaît par cœur de longue date. Roger a fait de ce lieu une pièce parmi celles d'un « palais mental », un espace coutumier dans lequel il ordonne mentalement une quantité phénoménale de cartes à jouer. Il utilise la méthode des *loci*, dite méthode des lieux, une stratégie de mémorisation bien connue des experts de la mémoire. Cette technique, introduite par Simonide de Céos dans l'Antiquité, permet à un individu de retenir un nombre considérable d'informations en un temps très restreint. Les informations mémorisées sont organisées au sein d'un espace mental, prenant la forme d'un lieu familier dans lequel les éléments devant être maintenus en mémoire sont associés à une partie du décor. Chaque élément visuel issu de cet espace mental fait office d'indice de récupération : lors de la remémoration, il suffit à l'individu de s'imaginer se déplacer dans l'édifice pour y récupérer progressivement les informations précédemment stockées. L'un des secrets est de toujours visiter les pièces du palais mental dans le même ordre, seules les informations déposées varient selon les besoins. L'utilisation de cette pratique permet d'impressionnantes performances en mémoire chez des individus entraînés à cette méthode. Par exemple, David Farrow a pu se remémorer un total de 3068 cartes grâce à cette technique (probablement en parcourant plusieurs édifices successifs longeant une rue imaginaire), remportant ainsi le record mondial de mémorisation du plus grand nombre de cartes à jouer en 2007. Par le biais de cette stratégie, l'expert procède à un traitement spatial délibéré de l'information mémorisée, rendu possible uniquement par le biais d'un entraînement intensif et répété[1].

[1] Un tel entraînement est par ailleurs souvent facilité par des associations apprises par cœur au préalable entre les nombres ou les cartes à jouer – qui n'ont guère de personnalité et qui ont tendance à se confondre – et des objets personnalisés dont les images sont bien plus vives, tels qu'un valet de cœur représenté par une pomme rouge ou le nombre 58 représenté par un cheval noir. Ce codage imagé permet de créer des associations rapides avec les emplacements au sein du palais, conduisant à des scènes mentales souvent loufoques et absurdes. Ces images insolites participent à créer un effet de bizarrerie favorable à la rétention mnésique. Par exemple, la visualisation du cheval assis de façon

Il s'avère qu'un phénomène similaire à la méthode des lieux peut s'observer de manière plus automatique lorsque des individus tout-venant réalisent une tâche de mémorisation à court terme. Ce processus correspond à un recodage non-délibéré d'éléments mémorisés successivement dans un espace mental interne, un phénomène nommé effet de spatialisation. La découverte d'une spatialisation opérant automatiquement en mémoire de travail[2] trouve ses origines dans les travaux sur l'effet SPoARC (en anglais : *Spatial-Positional Association of Response Codes,* Guida & Lavielle-Guida, 2014). Les travaux ayant mis en évidence cet effet suggèrent que la mémorisation s'appuierait spontanément sur un espace mental faisant office de support pour l'agencement et le traitement d'informations verbales. Cet espace serait assimilé à un tableau blanc, pour faire analogie à une sorte d'écran vierge où seraient inscrits les différents éléments encodés, permettant ainsi de les maintenir accessibles en mémoire de façon spatialement organisée (Abrahamse et al., 2014). Moins sophistiqué que le souvenir détaillé du palais mental auquel nous faisons référence plus haut, et sans nécessairement transformer les objets mémorisés eux-mêmes, cet espace mental constituerait pourtant une base solide pour favoriser le maintien de diverses informations sérielles. De même que l'expert ou l'orateur déambule dans un palais mental pour y placer des informations à mémoriser, l'individu suivrait un parcours pour agencer l'information au sein de l'espace mental, bien que plus rudimentaire sur un plan spatial. L'encodage séquentiel semble s'organiser le long d'un axe horizontal, sur lequel les éléments seraient agencés spatialement afin d'être distingués plus aisément. Ce réencodage spatial automatique semble trouver sa logique initiale dans le fait que les traces mnésiques doivent se distinguer visuellement. Par exemple, lors d'une tâche de mémorisation d'une série de couleurs, si toutes les couleurs étaient encodées mentalement de façon superposée au centre de cet espace, l'accumulation de ces différentes strates serait inefficace car il en ressortirait uniquement la perception de la dernière couleur, se substituant aux précédentes (ou une superposition de teintes se transformant en une grossière couleur marron). En revanche, l'agencement spatial de ces éléments favoriserait le processus de rappel, car les couleurs séparées spatialement demeureraient toutes identifiables mentalement. Au-delà d'une meilleure séparation des éléments à retenir simultanément, un encodage spatial linéaire présenterait également l'avantage de refléter la succession temporelle des éléments mémorisés. Chaque coordonnée spatiale constituerait un repère indiquant la position occupée par un élément dans la séquence, offrant ainsi une correspondance spatio-temporelle de la série au moment du rappel (Guida & Lavielle-Guida, 2014 ;

nonchalante sur le rebord du lavabo et la pomme rouge recouverte de mousse à raser facilitera le rappel successif du nombre et de la carte à jouer correspondants.

[2] Dans cette thèse, le terme *mémoire de travail* sera employé dans une acception générale – incluant également la mémoire à court terme – en accord avec la définition donnée par Cowan et al. (2005) et avec la conception que les tâches de mémoire à court terme et de mémoire de travail mobilisent des processus similaires à des degrés d'implication différents (e.g., Majerus et al., 2009 ; Unsworth & Engle, 2007).

Guida & Campitelli, 2019). Le système cognitif effectuerait ainsi un balayage de l'axe mental afin de récupérer les éléments donnés à mémoriser séquentiellement, à la manière dont des individus utilisant la méthode des lieux s'imaginent parcourir leur édifice pour y retrouver leurs informations. Et à l'instar d'un élément visuel figurant au sein du palais mental (comme un tiroir, un lavabo, un robinet), le marqueur spatial disposé sur l'axe mental constituerait un indice de rétention pour la récupération d'un item maintenu en mémoire de travail. Ce phénomène de spatialisation n'impliquant aucun entraînement particulier, il semble que le cerveau utilise spontanément une méthode de recodage analogue à la méthode des lieux... à moins que la méthode des lieux ne fonctionne justement parce que le cerveau utilise déjà un principe similaire automatiquement. Par exemple, une molécule chimique telle que l'héroïne agit en se fixant sur des récepteurs cérébraux déjà sensibles aux endorphines, ses équivalents naturels. Autrement dit, une molécule externe exploite un système interne préexistant. De manière analogue, la méthode des lieux pourrait être efficace parce que le cerveau est naturellement habitué à organiser des informations dans l'espace : le procédé mnémotechnique ne créerait alors pas de nouveau mécanisme, mais détournerait un mécanisme cognitif pré-existant et profondément enraciné (Guida & Lavielle-Guida, 2014).

Les travaux sur la spatialisation permettent d'enrichir la littérature plus large sur le codage sériel en mémoire de travail. Jusqu'à présent, deux grandes familles de modèles ont tenté de rendre compte de ce mécanisme (pour une revue, voir Hurlstone et al., 2014 ; Marshuetz, 2005). Une première famille de modèles considère que le traitement de l'ordre sériel résulte d'un processus de chaînage associatif, reliant les items les uns aux autres par des liens successifs. Selon cette conception, la capacité à rappeler une série d'éléments dans le bon ordre reposerait sur l'activation séquentielle des items, chaque élément jouant le rôle de signal permettant la récupération de l'élément suivant (Ebbinghaus, 1885 ; Jordan, 1986 ; Lewandowsky & Murdock, 1989 ; Wickelgren, 1965). Pour une deuxième famille de modèles, le traitement de l'ordre sériel en mémoire serait rendu possible par une association entre chaque item et un niveau contextuel (contexte prenant la forme de marqueurs ou tags positionnels) permettant de coder sa position sérielle dans la séquence (Brown et al., 2000 ; Burgess & Hitch, 1999 ; Oberauer & Lewandowsky, 2011 ; Portrat et al., 2016). Dans cette perspective, les modèles positionnels considèrent que la mémoire de travail encode deux dimensions complémentaires mais distinctes : d'une part, l'identité des éléments, correspondant à la mémorisation de l'*item*, et d'autre part, leur position au sein de la séquence, correspondant à la mémorisation de l'*ordre* (e.g., Dale, 1987 ; Engelkamp & Dehn, 2000 ; Henson et al., 2003 ; Majerus et al., 2006a). Ces deux types d'informations sont associés de manière temporaire lors de la mémorisation, de sorte que le système puisse rappeler les items dans le bon ordre en réactivant successivement les marqueurs de position correspondants. Les

mécanismes de spatialisation observés chez l'individu non-expert semblent en adéquation avec cette seconde famille de modèles. Là où la nature des marqueurs positionnels ne trouve guère consensus dans la littérature (Henson, 2001, 1999 ; Hurlstone et al., 2014), les études sur le SPoARC suggèrent que le maintien de l'ordre sériel en mémoire de travail pourrait spontanément s'appuyer sur des représentations spatiales implicites, les marqueurs de position pouvant alors être apparentés à des coordonnées spatiales au sein d'un espace mental interne.

Si la spatialisation de l'ordre sériel en mémoire constitue un mécanisme largement étudié chez l'adulte (voir Guida & Campitelli, 2019 ; Guida et al., 2025), l'évolution de ce phénomène au cours du développement reste encore peu explorée. Pourtant, la mémorisation de l'ordre sériel constitue un mécanisme fondamental impliqué dans de nombreux aspects de la cognition, tels que l'apprentissage du vocabulaire, la production du langage, le calcul, ou encore le raisonnement (Attout et al., 2014 ; Baddeley, 2003 ; Baddeley, 2012 ; Leclercq & Majerus, 2010). Comprendre comment la spatialisation se développe chez l'enfant pourrait ainsi contribuer à renseigner les mécanismes sous-jacents au traitement de l'ordre en mémoire de travail, ouvrant la voie à une meilleure compréhension des apprentissages complexes que ces mécanismes sous-tendent, ou des déficits qui leur sont associés (comme la dyslexie, Majerus & Cowan, 2016 ; Martinez-Perez et al., 2012 ; ou la dyscalculie, Attout & Majerus, 2015). C'est dans cette perspective que s'inscrit la présente thèse, qui visera à examiner le développement de la spatialisation sérielle chez l'enfant en recourant à plusieurs types de paradigmes expérimentaux. Avant d'introduire les trois volets empiriques qui composent ce travail de recherche, un premier Chapitre s'attachera à retracer les origines de l'effet SPoARC et à présenter les différentes manipulations expérimentales ayant permis d'en évaluer la robustesse, ainsi que d'en identifier les mécanismes. Nous aborderons également les travaux ayant étudié les composantes innées et culturelles de la spatialisation, tant sur le plan de la cognition numérique (un versant plus largement étudié dans la littérature) que sur le plan du traitement de l'ordre sériel. Nous nous attacherons ensuite à présenter les travaux majeurs ayant tenté de renseigner l'âge d'émergence de la spatialisation en mémoire de travail, en précisant en quoi ces études ont constitué le socle de notre propre démarche expérimentale.

Chapitre 1

Cadre théorique

1.1 Genèse des études sur l'effet SPoARC 6
1.2 Hypothèse du tableau blanc mental 11
1.3 Généralisation de l'effet SPoARC 14
1.4 De l'inné au culturel : le façonnement de la spatialisation 22
1.5 Théorie de l'expertise et développement de l'effet SPoARC 30
1.6 Présentation des chapitres expérimentaux 37

1.1 Genèse des études sur l'effet SPoARC

Les prémices de l'effet SPoARC sont liées à la découverte de l'effet SNARC (en anglais, *Spatial-Numerical Association of Response Codes*, Dehaene et al., 1993), un phénomène rendant compte d'une association entre nombres et espace. Dans leur étude princeps, Dehaene et al. (1993) ont demandé à des participants francophones de réaliser une tâche de jugement de parité en indiquant la nature paire ou impaire de chiffres cibles situés entre zéro et neuf (présentés dans un ordre aléatoire). Dans ce paradigme, les participants devaient indiquer leur réponse en appuyant sur des touches situées soit du côté gauche, soit du côté droit d'un clavier. Pour la moitié des essais, la main gauche était associée à la reconnaissance de chiffres pairs et la main droite à la reconnaissance de chiffres impairs, tandis qu'une assignation réponse/main inverse était utilisée dans l'autre moitié des essais. Les résultats de cette étude ont montré une variation significative dans la rapidité des réponses effectuées de la main droite et de la main gauche en fonction de la grandeur du chiffre traité. Pour les chiffres de faible grandeur (e.g., 1, 2, 3), les participants tendaient à répondre de manière significativement plus rapide de leur main gauche, tandis que les grands chiffres (e.g., 7, 8, 9) généraient des temps de réponse plus rapides de la main droite. Sur la base de ce résultat comportemental, Dehaene et al. (1993, mais voir aussi Galton, 1880) ont théorisé l'existence d'une ligne mentale numérique ancrée en mémoire à long terme, sur laquelle les petits chiffres seraient préférentiellement agencés du côté gauche, tandis que les grands chiffres seraient plus favorablement agencés du côté droit, en accord avec le sens de lecture et d'écriture du système occidental. Cette ligne mentale gauche-droite s'activerait automatiquement lorsque l'individu traite une information numérique, générant des biais de réponses latérales en fonction de la localisation du chiffre sur l'axe mental. L'existence de l'effet SNARC constitue un résultat particulièrement robuste, ce phénomène ayant été largement répliqué dans de nombreux travaux expérimentaux (voir Fischer & Shaki, 2014 ; Wood et al., 2008, pour une revue).

Par ailleurs, différentes études ont mis en évidence que la spatialisation de l'information numérique ne revêt pas un caractère stable et immuable. Dans leur étude princeps, Dehaene et al. (1993) ont par exemple observé une modulation de la valeur spatiale implicitement associée à l'information numérique en manipulant l'intervalle dans lequel les chiffres étaient présentés aux participants. Les auteurs ont identifié que des chiffres médians (quatre et cinq) étaient plus rapidement traités de la main droite lorsqu'ils correspondaient aux chiffres les plus grands de l'intervalle considéré (i.e., dans un intervalle situé entre zéro et cinq). À l'inverse, des réponses plus rapides de la main gauche étaient observées lorsque ces deux chiffres étaient les plus petits de l'intervalle proposé durant la tâche (i.e., entre quatre et neuf). Ces résultats ont permis d'identifier une spatialisation fondée sur la grandeur *relative* de l'information numérique,

déterminée par le contexte expérimental dans lequel l'information est codée (voir Fias et al., 1996, pour des résultats similaires). Des résultats en faveur d'une spatialisation flexible de l'information numérique ont également été mis en évidence par Bächtold et al. (1998), qui ont montré que des participants pouvaient spatialiser des chiffres de la gauche vers la droite ou de la droite vers la gauche, selon que ces chiffres étaient imaginés sur une règle graduée (impliquant que de petits chiffres soient représentés du côté gauche) ou sur une horloge (sur laquelle de petits chiffres sont représentés du côté droit). Cette inversion rapide de la spatialisation a conduit certains auteurs à considérer le rôle médiateur de la mémoire de travail dans l'observation d'associations entre nombres et espace chez l'individu. De manière critique, des études menées par Herrera et al. (2008) et van Dijck et al. (2009) ont montré une disparition de l'effet SNARC lorsque la mémoire de travail était saturée en situation de double tâche.

Inspirés de ces différents travaux et de leurs propres résultats, van Dijck et Fias (2011) ont proposé que la spatialisation de l'information numérique observée dans le cadre du SNARC puisse résulter non pas d'une ligne mentale stockée en mémoire à long terme de façon fixe, mais d'un codage spatial temporairement effectué au sein de la mémoire de travail de façon plus flexible. Selon ces auteurs, cet encodage spatial serait réalisé en fonction de l'information ordinale pour une séquence considérée durant la tâche. Pour tester cette hypothèse fondée sur la mémoire de travail, les auteurs ont adapté le paradigme de Dehaene et al. (1993) en proposant à leurs participants de mémoriser une série de cinq chiffres présentés séquentiellement au centre d'un écran dans un ordre aléatoire. À la suite de cette phase de mémorisation, les participants devaient exécuter une tâche de jugement de parité sur une série de chiffres, en répondant de leur main gauche pour des items pairs et de leur main droite pour des items impairs (une assignation réponse/main inversée au milieu de l'expérience). À la différence de la tâche de Dehaene et al. (1993), les participants ne devaient exécuter ce traitement de parité que lorsque les items présentés se trouvaient dans la séquence tout juste mémorisée (en suivant donc une procédure de type Go/No-Go). À la suite du jugement de parité, il était enfin demandé aux participants de reconnaître la séquence encodée parmi quatre séquences leurres afin de contrôler sa mémorisation. Les résultats obtenus par van Dijck et Fias (2011) grâce à ce nouveau protocole n'ont pas permis d'observer des réponses comportementales caractéristiques du SNARC (soit une interaction significative entre la main utilisée pour répondre et la grandeur des chiffres traités). À l'inverse, les temps de réponse des participants tendaient à différer en fonction de la position de l'item dans la séquence mémorisée. Pour des items placés en première position, des temps de réponse plus rapides étaient observés lorsque les participants répondaient de leur main gauche, et ce indépendamment de la grandeur du chiffre traité. Un pattern inverse était observé pour des items placés en dernière position, pour lesquels les participants exécutaient le jugement de parité plus rapidement avec la main droite. Ainsi, dans une

séquence telle que [9-2-5-7-1], le chiffre neuf, bien que présentant l'ordre de grandeur le plus élevé pour les chiffres, était associé à la gauche plutôt qu'à la droite en raison de sa position initiale dans la séquence maintenue en mémoire. En contrepartie, le chiffre un – de faible grandeur – était préférentiellement associé à la droite du fait de sa position tardive dans la série.

Sur un plan statistique, la spatialisation en mémoire de travail (i.e., l'effet SPoARC) se traduit par une interaction entre les positions des items dans la séquence mémorisée et les mains utilisées pour répondre. Cette interaction peut être représentée par deux droites de régression, montrant chacune une évolution graduelle des temps de réponse qui lui est propre. Tandis que la main gauche est caractérisée par une pente ascendante (impliquant des temps de réponse de plus en plus longs à mesure que la position de l'item mémorisé augmente), les réponses de la main droite se caractérisent par une pente de régression descendante (les participants étant de plus en plus rapides de leur main droite pour identifier des chiffres tardifs dans la séquence). Une autre manière de représenter ce différentiel consiste à soustraire les temps moyens de la main gauche à ceux de la main droite pour chaque valeur du facteur position. Un SPoARC orienté de gauche à droite se caractérise alors par une pente de régression descendante, reflétant un avantage progressif de la main droite à mesure que l'item est tardif dans la séquence (voir le Mini-exemple 1 en Annexe A pour un calcul détaillé). Cette pente de régression de la différence des temps de réponse entre main droite et main gauche (d_{TR}) en fonction de la position de l'item dans la séquence constitue la signature du SPoARC (voir la Figure 1.1 pour un exemple).

La disparition du SNARC sous cette procédure expérimentale a permis à van Dijck et Fias (2011) de théoriser un nouveau principe explicatif de la spatialisation fondé sur la mémoire de travail (pouvant être retrouvé sous le terme de *working memory account* dans la littérature, Abrahamse et al., 2016 ; Fias & van Dijck, 2016 ; van Dijck et al., 2014). Alors que la description initiale de l'effet SNARC traduisait l'activation d'une représentation spatiale des chiffres issue de la mémoire à long terme pour Dehaene et al. (1993), cet effet est sous ce nouvel angle interprété comme résultant d'un recodage spatial élaboré temporairement en mémoire de travail (et déterminé par la simple position sérielle des items au sein d'une séquence). Dans une tâche classique de jugement de parité de type SNARC (dans laquelle des chiffres sont traités tour à tour sans mémorisation préalable d'une séquence), l'information ordinale activée en mémoire de travail suivrait par défaut l'ordre canonique de la suite numérique « 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 » sur-apprise. L'information ordinale serait effectivement issue de la mémoire à long terme, mais n'aurait en revanche aucune dimension spatiale prédéfinie. C'est au moment où l'information ordinale serait transférée en mémoire de travail que le processus de spatialisation opérerait. L'étendue de cette séquence ordinale canonique dépendrait par ailleurs du contexte expérimental dans lequel le traitement numérique est effectué.

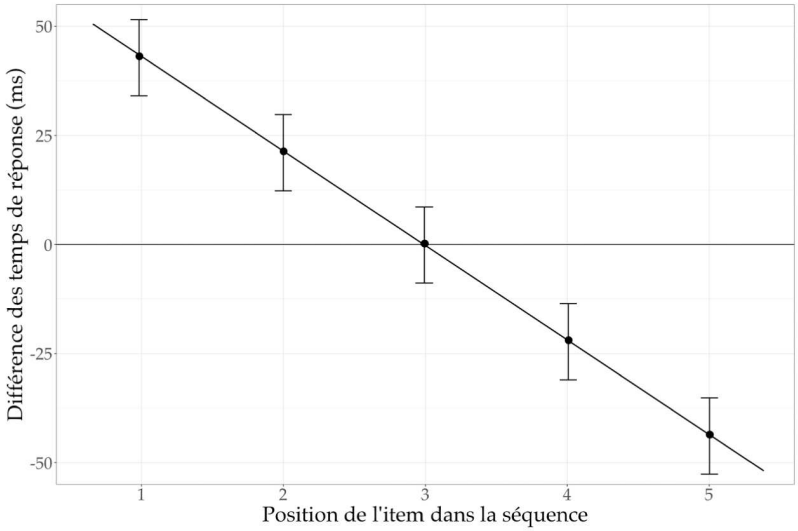


Figure 1.1 – Exemple d'une droite de régression de la différence des temps de réponse moyens entre main droite et main gauche (d_{TR}) en fonction de la position de l'item dans la séquence mémorisée. *Note.* Les valeurs de d_{TR} sont calculées en soustrayant les temps de réponse de la main gauche aux temps de réponse de la main droite pour chaque position ($d_{TR} = TR_{\text{main droite}} - TR_{\text{main gauche}}$). Une d_{TR} positive, retrouvée par exemple en position 1, indique des temps de réponse plus rapides de la main gauche. Une d_{TR} négative, observée par exemple en position 5, indique quant à elle des temps de réponse plus rapides de la main droite.

Par exemple, lorsque la tâche ne mobilise qu'un intervalle numérique restreint (tous les chiffres présentés étant par exemple compris entre zéro et cinq, Dehaene et al., 1993 ; Fias et al., 1996), seul un sous-ensemble spécifique serait activé en mémoire de travail, définissant la séquence de référence sur laquelle s'appliquerait le recodage spatial. Par ailleurs, lorsque la tâche implique plutôt la mémorisation d'une série arbitraire (comme dans l'étude de van Dijck & Fias, 2011), l'activation de la suite canonique s'avérerait moins pertinente, le traitement numérique s'appuyant alors préférentiellement sur la séquence effectivement maintenue en mémoire de travail.

Selon van Dijck et Fias (2011, voir aussi Fias et van Dijck, 2016 ; van Dijck et al., 2014), le SPoARC serait donc une manière d'expliquer l'effet SNARC. Dans tous ces cas de figure, le code spatial attribué à l'information ordinale serait généré à la volée, au moment où une séquence (soit nouvelle, soit apprise) est chargée en mémoire de travail. Ensuite, l'item cible qui doit être reconnu pour les besoins de la tâche serait mis en correspondance avec la séquence ordonnée activée pendant la tâche et nouvellement spatialisée. Selon ce principe explicatif, les liens spatiaux établis avec l'information seraient donc temporaires et se réorganiseraient en fonction du contexte expérimental. Selon le type de séquence utilisée comme référence (une suite ordinale canonique ou une série numérique aléatoire), un même recodage spatial de l'ordre des items en mémoire

de travail générerait des réponses latéralisées tantôt caractéristiques de l'effet SNARC ou de l'effet SPoARC (Abrahamse et al., 2014, 2016 ; van Dijck & Fias, 2011). En proposant une conception de la spatialisation fondée sur la mémoire de travail, van Dijck et Fias (2011) ont ainsi pu fournir un cadre explicatif unifié aux phénomènes associés au SNARC qui pouvaient difficilement être conciliés avec l'hypothèse d'une ligne numérique mentale fixe en mémoire à long terme. Outre sa capacité à rendre compte de la flexibilité de la spatialisation mise en évidence dans différents travaux (e.g., les effets d'intervalle identifiés par Dehaene et al., 1993 et Fias et al., 1996, ou les effets d'imagerie mentale observés par Bächtold et al., 1998), cette nouvelle conception a également pu fournir un cadre explicatif aux études ayant identifié une spatialisation pour des séquences canoniques non numériques (telles que des lettres de l'alphabet, des mois de l'année ou encore des jours de la semaine, Gevers et al., 2003, 2004), ou de nouvelles séquences arbitraires récemment sur-apprises (Previtali et al., 2010).

Sur la base de ces premiers résultats, van Dijck et Fias (2011) ont proposé que si la spatialisation était déterminée par la position d'un item dans une séquence, alors l'effet pourrait être observé pour tout type d'information sérielle codée en mémoire de travail. Ce postulat a conduit les auteurs à mener une seconde expérience, lors de laquelle les participants devaient mémoriser des séries de cinq noms de fruits et légumes présentés séquentiellement dans un ordre aléatoire. Suite à cette phase de mémorisation, les participants devaient exécuter une tâche de catégorisation sémantique, en indiquant si un item présenté à l'écran était un fruit ou un légume. De la même manière que dans leur première étude, les participants ne devaient exécuter la tâche de catégorisation que pour les items présents dans la séquence mémorisée. De nouveau, les participants répondaient par le biais de deux touches latéralisées. Un effet de position similaire à celui identifié dans la première étude a été observé pour ce nouveau matériel : les participants réalisaient plus rapidement la catégorisation de leur main gauche pour des items placés en début de séquence, et de leur main droite pour les derniers items. En proposant des stimuli non numériques et dépourvus de valeur ordinale canonique, van Dijck et Fias (2011) ont ainsi permis de généraliser l'effet SPoARC à la simple présence d'une structure sérielle arbitraire en mémoire de travail. Dans cette deuxième étude, les participants étaient également soumis à une tâche standard de jugement de parité, permettant de mesurer un SNARC selon la procédure de Dehaene et al. (1993). Les résultats ont montré que les effets SPoARC et SNARC obtenus par le biais de ces deux protocoles tendaient à corréler significativement entre les participants, une interaction ayant conduit van Dijck et Fias (2011) à considérer que la spatialisation de l'ordre sériel en mémoire de travail serait le dénominateur commun à ces deux effets[1].

[1] Cette conception fondée uniquement sur la mémoire de travail a par ailleurs pu être remise en question par des travaux subséquents, qui ont montré que les effets SNARC et SPoARC pouvaient coexister lors d'une tâche de spatialisation (Ginsburg & Gevers, 2015 ; Huber et al., 2016), et que l'interaction entre ces deux effets à l'échelle individuelle ne tend pas à être systématique (Ginsburg

1.2 Hypothèse du tableau blanc mental

Les travaux princeps de van Dijck et Fias (2011) ont permis d'identifier une association privilégiée entre ordre et espace en mémoire de travail, en montrant que la récupération mnésique conduisait à des biais directionnels orientés du côté gauche ou du côté droit en fonction de la position de l'élément traité. Ces résultats ont jeté les bases conceptuelles de la théorie du « tableau blanc mental » (Abrahamse et al., 2014). Selon cette hypothèse, un espace mental (i.e., une structure spatiale abstraite réutilisable servant de gabarit) serait spontanément activé en mémoire de travail lorsque l'individu maintient temporairement une série d'informations. Cet espace mental est communément assimilé par analogie à un tableau blanc, qui servirait de support à l'organisation de l'information mémorisée. Tout comme l'individu interagirait avec un vrai tableau dans son espace physique, le système cognitif y « transcrirait » mentalement les items pour soutenir le traitement de la série dans le bon ordre. Cette transcription mentale suivrait naturellement le sens de lecture et d'écriture, impliquant que les items soient codés de la gauche vers la droite chez des individus occidentaux. Lorsqu'un élément spécifique doit être récupéré lors de la tâche, l'individu mobiliserait des mécanismes internes d'attention spatiale pour balayer cet espace mental sur lequel l'item est représenté. Ces déplacements attentionnels influenceraient alors les réponses latérales des participants en fonction de l'emplacement de l'item sur cet espace, conduisant à une facilitation lorsque la position spatiale de l'item en mémoire est congruente avec le code spatial assigné à la réponse (par exemple, lorsqu'un item codé mentalement du côté gauche doit être identifié par la main gauche)[2].

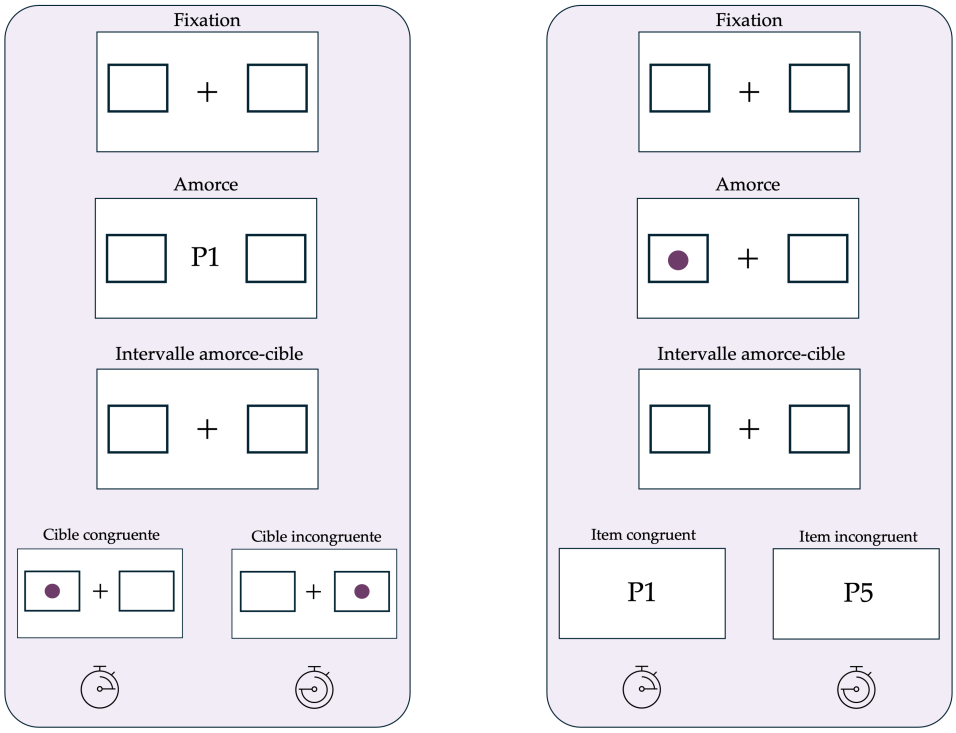
Sur la base de la conceptualisation du tableau blanc mental, l'implication de l'attention spatiale dans le traitement de l'ordre en mémoire a pu être empiriquement validée par une série de travaux ayant mêlé la tâche de spatialisation développée par van Dijck et Fias (2011) et le paradigme d'amorçage spatial de Posner et al. (1980). Dans ce paradigme, les participants doivent communément détecter le plus rapidement possible un point cible apparaissant soit du côté gauche, soit du côté droit de l'écran. Classiquement, la présence préalable d'une amorce directionnelle (par exemple, une flèche

& Gevers, 2015). Des approches fondées sur une origine duelle (Ginsburg et al., 2014 ; Ginsburg & Gevers, 2015 ; Huber et al., 2016) ou sur la notion d'expertise (Guida & Campitelli, 2019) tendent ainsi à considérer que le SPoARC et le SNARC reposeraient sur des mécanismes distincts. La théorie de l'expertise sera notamment développée dans la section 1.5 de ce cadre théorique, du fait de son implication concernant le développement du SPoARC chez l'enfant.

[2] La question de savoir si cet espace mental privilégie plutôt un axe horizontal reste par ailleurs une question peu renseignée dans la littérature, dans la mesure où le continuum testé reste critiquement lié à la nature des tâches, lesquelles privilégient pour la plupart un traitement latéral (en utilisant par exemple les mains disposées à gauche et à droite du clavier). Quelques études ont néanmoins montré que des associations entre ordre et espace peuvent s'observer également sur un axe vertical (e.g., Hartmann et al., 2021) et sagittal (e.g., Attout et al., 2025).

pointant vers la gauche ou vers la droite) influence la rapidité de la détection : les réponses des participants sont facilitées lorsque l'orientation de la flèche est congruente avec la localisation du point cible, tandis que des temps de détection plus longs sont observés en cas d'incongruence entre les deux stimuli (par exemple, si un point apparaît à droite alors que la flèche orientait préalablement l'attention vers le côté gauche). En s'appuyant sur ce paradigme, van Dijck et al. (2013) ont mis au point une version adaptée de la tâche de Posner visant à mesurer la spatialisation de l'ordre sériel. Dans ce nouveau protocole, les participants devaient mémoriser une série de quatre chiffres présentés dans un ordre aléatoire, pour ensuite détecter le plus vite possible un point présenté soit du côté gauche, soit du côté droit de l'écran. Par ailleurs, van Dijck et al. (2013) ont remplacé la flèche utilisée dans la tâche de Posner par un chiffre amorce qui pouvait ou non faire partie de la séquence précédemment encodée. Pour solliciter un traitement mnésique, van Dijck et al. (2013) ont demandé à leurs participants de réaliser la tâche de détection de cible uniquement lorsque le chiffre amorce correspondait à un item effectivement mémorisé. Les réponses des participants étaient enregistrées par une touche centrale (Expériences 1 et 2), ou par le biais d'une clé vocale (Expérience 3). De façon notable, van Dijck et al. (2013) ont observé une interaction entre la position du chiffre amorce et l'emplacement du point cible sur les temps de réaction des participants. Les résultats ont montré que la récupération d'un chiffre placé au début de la séquence facilitait la détection du point cible lorsque celui-ci apparaissait du côté gauche, tandis que des réponses plus lentes étaient observées lorsque ce même item était suivi d'un point localisé du côté droit. Le pattern inverse était observé pour des éléments en fin de séquence, qui facilitaient la détection du point cible uniquement lorsque ce dernier était présenté du côté droit (voir la Figure 1.2a pour un exemple). Par le biais de ces résultats, van Dijck et al. (2013) ont montré que la récupération d'un élément en mémoire de travail induisait des déplacements attentionnels dans l'espace externe, orientés selon la position sérielle de l'item, résultat duquel il est possible d'inférer qu'un déplacement attentionnel interne a eu lieu du fait d'une spatialisation mentale. Un an plus tard, ces résultats ont été généralisés au traitement de stimuli alphabétiques (van Dijck et al., 2014 ; voir également Rasoulzadeh et al., 2021, pour une étude en EEG).

Par la suite, de Belder et al. (2015) ont souhaité savoir si l'interaction entre ordre sériel et attention spatiale pouvait également être observée dans le sens inverse. En reconfigurant le protocole expérimental de van Dijck et al. (2013, 2014), de Belder et al. (2015) ont montré que la présentation d'un indice exogène latéralisé facilitait la récupération subséquente d'un item en cas de congruence spatiale et sérielle (par exemple, un point situé à gauche amorçant la présentation d'un item en première position dans la séquence, voir la Figure 1.2b). C'est sur la base de cette interaction bidirectionnelle entre ordre en mémoire et attention spatiale que Abrahamse et al.



(A) (B)

Figure 1.2 – Exemple des tâches de détection de cible utilisées dans l'étude de van Dijck et al. (2013) (A) et de de Belder et al. (2015) (B). *Note.* Le panel gauche montre que la présentation d'un item amorce placé en première position (P1) facilite la détection subséquente d'un point cible situé à gauche de l'écran, tandis qu'un point situé à droite sera identifié plus lentement par le participant. Le panel droit (B) montre à l'inverse que le traitement préalable d'un point cible situé à gauche facilite la récupération subséquente d'un item placé en première position (P1), là où un item plus tardif (e.g., P5) sera reconnu plus lentement par le participant. Figure adaptée de van Dijck et al. (2013, Fig. 1.a., p. 1856).

(2014) ont étayé leur hypothèse du tableau mental. En mettant en lien l'ensemble de ces travaux empiriques avec les modèles positionnels du codage de l'ordre en mémoire de travail (e.g., Brown et al., 2000 ; Burgess & Hitch, 2006 ; Burgess & Hitch, 1999 ; Henson, 1998), et sous l'hypothèse que des mécanismes attentionnels opèrent de façon similaire que ce soit sur des représentations externes ou des représentations internes (Kiyonaga & Egner, 2013), Abrahamse et al. (2014, p.2) ont proposé trois principes pour rendre compte de la mémorisation de l'ordre sériel : *i)* les marqueurs de position permettant de coder l'ordre d'une série d'éléments devraient être considérés comme des coordonnées dans un système interne spatialement défini, *ii)* l'attention spatiale interne interviendrait dans la recherche séquentielle au sein de cette représentation spatialisée, et *iii)* la récupération d'un item correspondrait à une sélection permise par ces mêmes mécanismes attentionnels. Selon Abrahamse et al. (2014, voir aussi Abrahamse et al., 2016, 2017), le traitement spatial serait donc le medium privilégié pour coder l'ordre sériel en mémoire de travail.

1.3 Généralisation de l'effet SPoARC

Les travaux ultérieurs consacrés à l'effet SPoARC ont permis d'établir la présence d'un phénomène robuste et largement réplicable sous différentes conditions expérimentales. Au-delà de permettre la réplicabilité de l'effet, les nombreuses variations méthodologiques retrouvées dans la littérature ont également permis de mieux cerner les facteurs pouvant moduler l'expression du phénomène et d'en préciser les mécanismes sous-jacents. Parmi les différentes manipulations possibles, cette section se concentrera sur la variation du type de matériel mémorisé par les participants, le type de traitement effectué lors de la tâche diagnostique mesurant la spatialisation, ou encore la nature des mesures comportementales recueillies afin d'examiner l'effet.

Différents types de matériel Les travaux présentés ci-haut ont permis d'identifier qu'une spatialisation opère lorsque les participants maintiennent en mémoire des séries de chiffres (van Dijck & Fias, 2011 ; van Dijck et al., 2013, 2014 ; voir aussi Ginsburg et al., 2014 ; Huber et al., 2016 ; van Dijck et al., 2015 ; Wang et al., 2018), des noms communs (van Dijck & Fias, 2011 ; voir aussi Ginsburg et al., 2017 ; Guida et al., 2018a ; van Dijck et al., 2022 ; Zhou et al., 2019, 2021) et des séries de lettres (de Belder et al., 2015 ; van Dijck et al., 2014 ; voir aussi Fenwick et al., 2025 ; Guida et al., 2020a ; Hartmann et al., 2021). D'autres travaux ont également mis en évidence un effet de spatialisation lors de tâches requérant la mémorisation de patchs de couleurs (e.g., Guida et al., 2018b ; Shi et al., 2020 ; Tian & Fischer-Baum, 2025). Pour toutes ces études, les informations mémorisées par les participants étaient encodées dans une modalité visuelle (les items étant présentés à l'écran durant la tâche), mais une autre série de travaux a permis de montrer que la spatialisation pouvait également être détectée lorsque le matériel mémorisé est encodé en modalité auditive. L'une des premières études à avoir montré la généralisation de l'effet à des stimuli auditifs a été réalisée par Guida et al. (2016), qui ont tenté d'observer un effet SPoARC « dans le noir ». Dans leur étude, les participants mémorisaient des séries de consonnes les yeux bandés, empêchant ainsi tout traitement de nature visuelle durant la tâche. En montrant la persistance de l'effet dans cette condition expérimentale, les auteurs ont mis en évidence que la spatialisation ne relevait pas d'un artefact visuel (conditionné par exemple par le traitement des items dans un environnement visuel typiquement associé aux activités de lecture et d'écriture, artefact que l'écran d'un ordinateur pourrait par exemple induire), mais bien d'un recodage interne amodal opérant indépendamment du canal d'entrée sensoriel. La spatialisation de stimuli auditifs a notamment été observée pour des séries de consonnes (Guida et al., 2016, 2020c ; Tian & Fischer-Baum, 2025), des séries numériques (Antoine et al., 2017 ; Sahan et al., 2022), ou encore pour des mots communs (voir par exemple Bottini et al., 2016, pour des adultes voyants et

des aveugles tardifs). La spatialisation d'une information auditive a également pu être étendue à la mémorisation de notes de musique chez des musiciens experts (Guida & Porret, 2022).

Si l'émergence de l'effet SPoARC ne semble pas dépendre de la modalité d'encodage (visuelle ou auditive), différentes études ont permis d'identifier des types de matériel pour lesquels la spatialisation s'avère plus difficile à détecter. Une large série d'expériences menées par Ginsburg et al. (2017) a notamment tenté de déterminer si la spatialisation pouvait être généralisée au domaine spatial. Pour tester cette hypothèse, les auteurs ont demandé à leurs participants de mémoriser des séries de noms communs (des noms de fruits et de légumes), en opposition à une condition spatiale dans laquelle les participants devaient mémoriser une séquence de quatre points noirs positionnés sur une matrice invisible. Tandis qu'un SPoARC a pu être détecté dans la condition verbale, les résultats de Ginsburg et al. (2017) n'ont pas permis d'identifier un effet significatif dans la condition spatiale, l'absence d'effet ayant été répliquée au cours de trois expériences consécutives (Expériences 1 à 3). Suite à ce résultat, les auteurs ont émis l'hypothèse que la spatialisation en mémoire de travail pourrait être limitée au traitement de stimuli verbalisables. Une première manipulation expérimentale a permis de tester cette hypothèse en comparant la spatialisation pour des images facilement verbalisables (des dessins concrets d'objets ou de nourriture) et des images pour lesquelles un codage verbal était difficilement applicable (des dessins abstraits). Les participants, qui étaient soumis aux deux conditions expérimentales, devaient préciser le type de stratégie qu'ils avaient employée afin de maintenir en mémoire le matériel présenté. Sur la base de ces informations, les auteurs ont regroupé les participants en deux catégories : les participants ayant appliqué une stratégie verbale pour encoder le matériel, y compris pour le matériel abstrait (verbaliseurs), et ceux n'ayant pas codé le matériel verbalement (non-verbaliseurs). Les résultats ont mis en évidence un lien entre spatialisation et verbalisation dans cette quatrième étude : quel que soit le type de matériel encodé (abstrait ou concret), l'effet SPoARC était détecté lorsque les participants appliquaient une stratégie verbale pour maintenir l'information. Pour préciser l'impact de la verbalisation sur l'émergence du phénomène, Ginsburg et al. (2017) ont ensuite tenté d'endiguer toute stratégie verbale en mesurant l'effet SPoARC sous suppression articulatoire. Cette suppression était appliquée soit durant la phase d'encodage (Expérience 5.a), soit durant la phase de rétention (Expérience 5.b). Dans les deux cas, le matériel mémorisé par les participants correspondait à des dessins concrets. Contrairement aux effets attendus, l'effet SPoARC s'est avéré persister sous suppression articulatoire, conduisant les auteurs à attribuer la spatialisation non pas à une stratégie verbale, mais à la mise en œuvre d'un traitement sémantique plus profond (sous l'hypothèse que la suppression articulatoire n'endigue pas l'accès au contenu sémantique de l'item, voir Poirier et al., 2015). Dans le but de distinguer verbalisation

et traitement sémantique, Ginsburg et al. (2017) ont ensuite comparé le SPoARC lors de la mémorisation de mots concrets *versus* de pseudomots dans une dernière étude. Leurs résultats ont indiqué que l'effet SPoARC ne pouvait être observé pour le traitement de pseudomots, à moins que les participants n'aient recodé ces pseudomots en leur attribuant un contenu sémantique. Par le biais de ces différentes manipulations, Ginsburg et al. (2017) ont permis d'étendre la généralisation de l'effet SPoARC à des stimuli imagés (e.g., des dessins concrets), et de mettre en évidence qu'un matériel spatial ne conduit pas à l'observation d'une spatialisation orientée de gauche à droite[3]. Ginsburg et al. (2017) ont également souligné que l'effet pourrait nécessiter un traitement dépassant le simple encodage verbal, le matériel semblant devoir être traité de manière suffisamment profonde sur le plan sémantique pour être spatialisé durant la tâche.

Ces résultats apportés par Ginsburg et al. (2017) ont par la suite été discutés dans un commentaire de Abrahamse et Guida (2018). Selon les auteurs, l'impossibilité d'un recodage sémantique dans la tâche impliquant la mémorisation de pseudomots aurait pu causer une augmentation de la charge mnésique, créant des conditions peu propices à la spatialisation (l'association d'un pseudomot à une image ou un concept – par exemple, l'item *paratui* associé au concept parapluie – permettant de compresser l'information phonologique, là où le maintien des unités phonologiques brutes mobilise davantage de ressources en mémoire). Pour cause, l'effet SPoARC apparaît intrinsèquement lié aux limites de la mémoire de travail (estimée à environ quatre unités selon Cowan et al., 2005), dans la mesure où son intensité diminue à mesure que le nombre d'items codés lors de la tâche est conséquent. Un premier résultat en faveur de cette idée a été apporté par Huber et al. (2016), qui ont comparé l'effet SPoARC avec des séries de quatre, cinq et six items. Bien qu'une variation de la spatialisation entre ces différentes longueurs n'ait pas pu être explicitement mise en évidence en prenant en compte les temps de réponse des participants, l'analyse de l'effet SPoARC par le biais des taux de réussite a montré une réduction de la spatialisation à mesure que la longueur de la série augmentait, avec une différence identifiée principalement entre les séries de quatre et de six items. En complément, Guida et al. (2018a) ont montré qu'aucun effet SPoARC ne pouvait être observé pour des séries arbitraires dépassant de loin la capacité mnésique moyenne des participants (correspondant dans cette étude à des séries de quinze noms communs). Dans la littérature, une grande majorité des études a permis l'identification

[3] L'absence d'un recodage gauche-droite pour les informations spatiales présentées dans l'étude de Ginsburg et al. (2017) peut être interprétée à la lumière du principe de parcimonie proposé par Guida et Campitelli (2019). Selon les auteurs, le système cognitif ne mobiliserait pas de ressources supplémentaires pour recoder spatialement une information qui possède déjà une organisation spatiale explicite dans l'environnement (comme dans la tâche de Ginsburg et al., 2017). Un tel principe a notamment pu être validé expérimentalement par Guida et al. (2020b), qui ont montré que des individus francophones pouvaient présenter un SPoARC inversé lorsque les items étaient présentés de droite à gauche à l'écran lors de la mémorisation.

d'un effet pour des séries de quatre (e.g., de Belder et al., 2015 ; Ginsburg et al., 2017 ; Guida et al., 2018b ; van Dijck et al., 2013, 2014) ou de cinq éléments (e.g., Guida et al., 2016, 2018a ; Shi et al., 2020 ; van Dijck & Fias, 2011).

Variation de la tâche diagnostique et rappel de l'ordre Le protocole expérimental employé pour mesurer le SPoARC repose communément sur trois étapes successives : *i)* une phase d'encodage lors de laquelle des items sont présentés séquentiellement en vue d'une mémorisation, *ii)* une tâche diagnostique permettant de mesurer la spatialisation, et *iii)* une phase de vérification permettant de contrôler que la série a bien été mémorisée dans le bon ordre (voir la Figure 1.3 pour un exemple). La phase diagnostique initialement proposée par van Dijck et Fias (2011) impliquait une tâche de classification de l'information mémorisée effectuée sous une consigne Go/No-Go. Ce type de consigne engage à la fois (dans le cas « Go ») une récupération de l'item mémorisé, suivi d'un traitement additionnel de cet item (le participant devant par exemple juger la parité de l'item seulement si celui-ci faisait partie de la série mémorisée). De nombreuses études ont permis de répliquer l'effet par le biais de cette procédure, le SPoARC ayant pu être observé lorsque des participants exécutent des jugements catégoriels basés sur la parité ou la grandeur numérique (Ginsburg et al., 2014 ; Ginsburg & Gevers, 2015 ; Huber et al., 2016 ; van Dijck & Fias, 2011), sur la catégorie sémantique des items (e.g., fruits ou légumes, Bottini et al., 2016 ; van Dijck & Fias, 2011 ; van Dijck et al., 2022 ; Zhou et al., 2019, 2020), sur des propriétés alphabétiques (e.g., un jugement de consonne ou de voyelle, Hartmann et al., 2021), ou encore sur un traitement plus perceptif, comme une classification de couleurs (Ginsburg et al., 2017). Par ailleurs, la littérature indique qu'une tâche additionnelle (impliquant un traitement des propriétés sémantiques ou perceptives de l'item au moment de la récupération) ne constitue pas une condition nécessaire pour observer le SPoARC. Un nombre substantiel d'études a en effet montré qu'une simple tâche de reconnaissance (basée sur le paradigme de Sternberg, 1966) permettait de détecter des associations spatio-positionnelles en mémoire de travail. L'une des premières études à avoir par exemple montré un lien entre ordre et espace en l'absence d'un traitement sémantique ou perceptif explicite au moment du test a été réalisée par Guida et al. (2016). Dans cette étude, les auteurs ont demandé aux participants d'encoder une série de cinq consonnes lors d'une première phase de mémorisation. Par la suite, les participants devaient indiquer si un nouvel item (une sonde) faisait partie ou non de la série mémorisée en répondant de leur main gauche ou de leur main droite (l'assignation des réponses « oui » et « non » aux deux mains étant inversée en milieu de tâche). Les résultats ont montré un SPoARC significatif, indiquant que l'effet se généralise à une simple tâche de reconnaissance, sans le traitement additionnel des items propre aux tâches Go/No-Go (voir aussi Fenwick et al., 2025 ; Guida et al., 2018a, 2018b, 2020a, 2020c ; Guida & Porret, 2022 ; Tian &

Fischer-Baum, 2025).

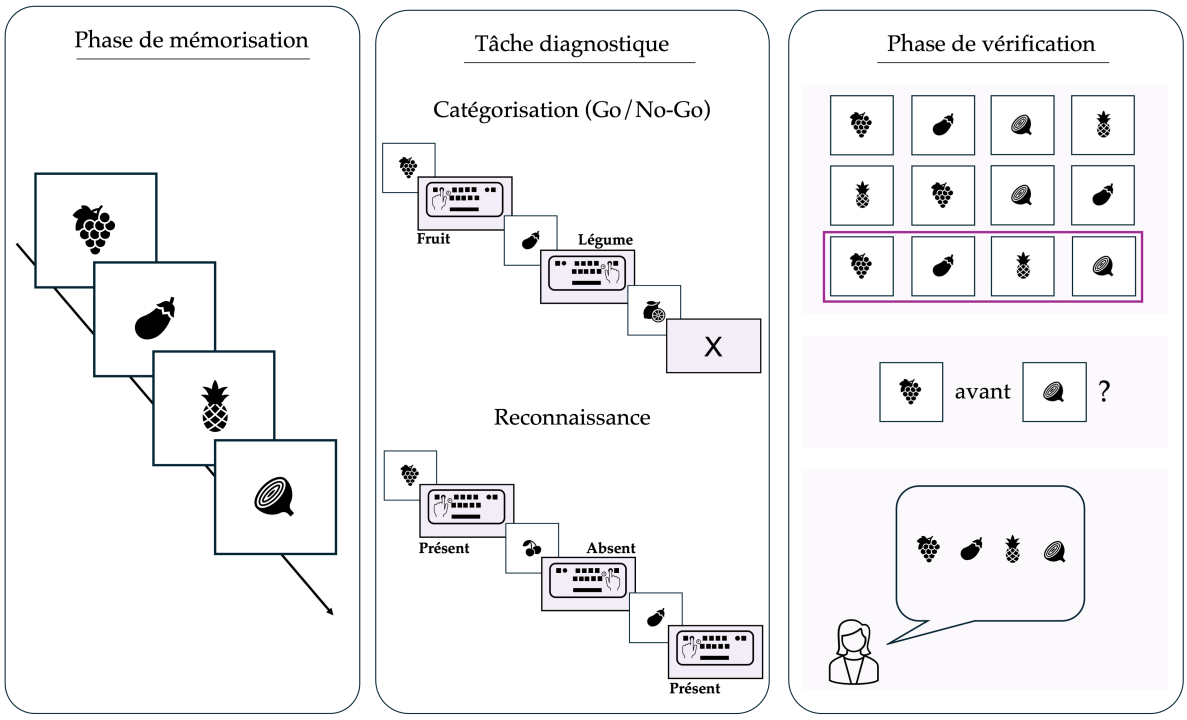


Figure 1.3 – Paradigme expérimental de référence pour la mesure de l'effet SPoARC. *Note.* Ce paradigme comporte trois étapes distinctes : le premier temps de l'expérimentation consiste à proposer une tâche classique de mémorisation à court terme d'une séquence d'items (A). Ensuite, une tâche diagnostique est effectuée pendant l'intervalle de rétention, à savoir la période de quelques secondes située entre l'encodage et le rappel, permettant de collecter la réponse comportementale du participant (B). Un phase de vérification (optionnelle) peut enfin être proposée pour s'assurer que le participant a bien retenu l'ordre de présentation des items (C).

De manière notable, l'étude de Guida et al. (2016) a également permis d'identifier que le SPoARC se manifeste même lorsque le traitement explicite de l'ordre des items n'est pas requis pendant la tâche. Dans la littérature, un grand nombre d'études ont fait usage d'une phase de vérification à l'issue de la tâche diagnostique, en demandant par exemple aux participants de reconnaître la séquence mémorisée parmi des séries leurres, de juger si des paires d'items étaient présentées dans le bon ordre, ou encore de rappeler verbalement l'ensemble de la série sans erreur (e.g., Ginsburg et al., 2017 ; Guida et al., 2018b ; Hartmann et al., 2021 ; Huber et al., 2016 ; van Dijck et al., 2013, 2014, 2015 ; Zhou et al., 2020, voir la Figure 1.3c pour un exemple). À la différence de ces études, aucune phase de vérification n'était proposée dans la tâche de Guida et al. (2016), les participants devant simplement exécuter la tâche de reconnaissance avant de passer à l'essai suivant. En montrant la persistance de l'effet sous cette condition expérimentale, les auteurs ont ainsi permis de mettre en exergue un phénomène implicite qui émerge même lorsque le traitement de l'ordre n'est pas pertinent pour mener à bien la tâche.

La généralisation de l'effet à des tâches ne nécessitant pas un traitement explicite de l'ordre a pu également être répliquée dans des études subséquentes (Fenwick et al., 2025 ; Guida et al., 2018a, 2020a, 2020c ; Shi et al., 2020 ; Wang et al., 2018), renforçant l'idée que la spatialisation constitue un mécanisme recruté spontanément pour coder l'ordre en mémoire de travail, et que l'ordre lui-même est encodé spontanément lors de la mémorisation.

Différentes mesures comportementales Les études sur le SPoARC utilisent en général la collecte de temps de réponse bimanuels pour mesurer la spatialisation (probablement parce que les travaux initiaux s'appuyaient déjà sur cette mesure). Que les participants doivent juger de la nature d'un item (par exemple, pair *vs.* impair) ou de son appartenance à la séquence (présent *vs.* absent), les réponses sont communément collectées par le biais de deux effecteurs (main gauche *vs.* main droite), avec un contrebalancement opérant en cours de tâche – ou entre les participants – pour obtenir des mesures pour chaque combinaison des facteurs Main et Position (e.g., Fenwick et al., 2025 ; Ginsburg et al., 2014, 2017 ; Guida et al., 2016, 2018a, 2018b, 2020a, 2020c ; Guida & Porret, 2022 ; Huber et al., 2016 ; Tian & Fischer-Baum, 2025 ; van Dijck & Fias, 2011 ; van Dijck et al., 2022). Néanmoins, d'autres travaux ont eu recours à des mesures comportementales alternatives pour mesurer l'effet : une étude de van Dijck et al. (2015) a par exemple montré une association entre ordre et espace dans le cadre d'une réponse unimanuelle (les réponses « gauches » étant effectuées avec le pouce et les réponses « droites » avec l'auriculaire de la main dominante). Des réponses non latéralisées ont également été collectées dans les études de van Dijck et al. (2013, 2014), où les participants devaient détecter une cible en répondant de leur main dominante sur un bouton central ou par clé vocale (la composante spatiale permettant d'associer une direction à chaque position ordinale correspondant ici aux deux carrés situés à gauche et à droite de l'écran, voir la Figure 1.2 dans la section précédente).

Dans toutes ces études, la mesure du SPoARC repose sur une variation des *temps de réaction* en fonction de la position sérielle des items et de la latéralité spatiale de la réponse ou du stimulus (main, doigt ou cible du côté gauche *vs.* du côté droit). Cependant, des études comme celles d'Antoine et al. (2017) ont permis d'étendre la mesure du phénomène à des réponses comportementales moins conventionnelles, en examinant par exemple la présence du SPoARC lors de tâches de segmentation de lignes. Dans leur expérience, les auteurs ont d'abord demandé aux participants d'encoder des séries de cinq chiffres présentées en modalité auditive. Par la suite, les participants devaient effectuer deux tâches distinctes : dans la première, il leur était demandé de réaliser un jugement spatial en identifiant le segment le plus long d'une ligne déjà sectionnée en deux parties (« *landmark task* »). Dans une seconde tâche, des lignes continues étaient présentées aux participants, qui devaient les segmenter en deux parties égales à l'aide d'un stylet.

En adéquation avec une procédure Go/No-Go, les participants ne devaient exécuter ces deux tâches que lorsque la ligne présentée était associée à un item appartenant à la série précédemment mémorisée. Dans les deux conditions, une association entre ordre et espace a été identifiée : dans la tâche de jugement spatial, les segments situés à droite étaient identifiés comme étant les plus longs lorsque les participants traitaient des items situés en fin de séquence. Dans la tâche de segmentation, le point médian tracé par les participants déviait significativement plus vers la droite à mesure que l'item traité était plus tardif dans la série mémorisée. Au delà de collecter de manière originale une réponse unimanuelle à effectuer sur un écran tactile dans cette deuxième tâche, Antoine et al. (2017) ont également contribué à réfuter l'idée que la spatialisation en mémoire de travail repose sur un principe de polarité des réponses et des stimuli (Proctor & Cho, 2006). Selon ce principe, des concepts comme « droit », « haut » ou « fin » seraient codés comme ayant une polarité positive (car considérés comme la dimension dominante), tandis que des concepts comme « gauche », « bas » ou « début » seraient préférentiellement associés à une polarité négative. Une correspondance fondée sur un principe de polarité conduirait alors naturellement à une association binaire entre ordre et espace, où les items reliés au concept « début » seraient associés à la dimension gauche, et les items reliés au concept « fin » seraient associés à la dimension droite. En identifiant un biais de segmentation augmentant linéairement avec la position sérielle des items dans leur deuxième tâche, Antoine et al. (2017) ont néanmoins montré que l'association entre ordre et espace ne se limite pas à une correspondance dichotomique pré-encodée, mais revêt plutôt un caractère continu.

Par ailleurs, d'autres études ont permis de mettre en évidence le caractère continu et analogique de la spatialisation, notamment en mesurant l'effet SPoARC par le biais de réponses oculaires. La première étude ayant permis d'apprécier le SPoARC avec cette mesure comportementale a été réalisée par Rinaldi et al. (2015). Dans cette étude, les participants devaient mémoriser des séries de cinq chiffres présentés dans un ordre aléatoire au centre d'un écran d'ordinateur. Par la suite, les participants devaient exécuter une tâche de reconnaissance, en indiquant oralement si différents items présentés un à un faisaient ou non partie de la série mémorisée. À la suite de cette phase de reconnaissance, les participants devaient rappeler la séquence complète dans l'ordre de présentation. Rinaldi et al. (2015) ont enregistré les mouvements oculaires spontanés des participants à la fois lors de la phase de reconnaissance et lors du rappel, sous l'hypothèse que les réponses orales des participants s'accompagneraient de déplacements oculaires reflétant une « relecture » mentale de la série maintenue en mémoire. Tandis qu'aucune variation significative n'a pu être repérée lors de la phase de reconnaissance, les auteurs ont mis en évidence des déviations oculaires caractéristiques d'une spatialisation lors de la phase de rappel : lors de la restitution de la séquence, le regard des participants se déplaçait progressivement vers la droite à mesure qu'ils énonçaient des

items plus tardifs. Par la suite, Sahan et al. (2022) ont montré que ces déviations progressives pouvaient également être observées lorsque l'individu réalise un traitement isolé de l'information mémorisée. En permettant une mesure plus libre des mouvements oculaires par le biais d'un paradigme auditif, les auteurs ont observé que les yeux des participants déviaient d'autant plus vers la droite que l'élément récupéré lors d'une tâche de détection en Go/No-Go occupait une position tardive dans la séquence. En complément des indicateurs comportementaux du SPoARC décrits plus haut, les déviations oculaires spontanées identifiées dans les études de Rinaldi et al. (2015) et Sahan et al. (2022) ont constitué un appui empirique supplémentaire à l'hypothèse du tableau blanc : les items d'une séquence seraient codés le long d'un *continuum* spatial que l'individu balaierait mentalement de gauche à droite pour soutenir la récupération d'un item spécifique, ou pour guider la restitution complète de la série mémorisée. Dans cette optique, la position du regard refléterait le focus de l'attention interne, comme si le système oculomoteur suivait le parcours de la pensée. Ce phénomène illustre ce que certains auteurs appellent l'« œil de l'esprit » (Kosslyn et al., 1979), montrant que les schémas moteurs recrutés dans l'exploration visuelle de l'environnement sont remobilisés pour guider le balayage attentionnel interne de l'information mémorisée.

Pour résumer, un grand nombre d'études se sont attachées à répliquer l'observation d'associations entre des éléments ordonnés dans une séquence et des informations spatiales en mémoire de travail depuis l'étude princeps de van Dijck et Fias (2011). Sur le plan du matériel mémorisé, l'effet SPoARC s'est révélé généralisable à différents types de stimuli, et semble modulé tant par le codage sémantique des items durant la tâche (Ginsburg et al., 2017) que par le nombre d'items mémorisés (Guida et al., 2018a ; Huber et al., 2016 ; voir aussi Vivion et al., 2025b). Les études décrites dans cette section ont permis d'identifier que des associations spatio-positionnelles s'observent dans des tâches requérant le maintien et le traitement actif de l'information (e.g., Ginsburg et al., 2014 ; van Dijck & Fias, 2011 ; Zhou et al., 2019), mais également dans des tâches impliquant uniquement une rétention à court terme (e.g., Fenwick et al., 2025 ; Guida et al., 2016, 2020a). Les études sur le SPoARC ont également permis de mettre en évidence un mécanisme implicite, opérant sans que l'ordre sériel ne constitue une composante nécessaire pour mener à bien la tâche (e.g., Guida et al., 2016, 2018a ; Wang et al., 2018). Les variations méthodologiques décrites dans ce chapitre montrent aussi un phénomène généralisable à différentes mesures comportementales, qu'elles soient instrumentales (e.g., un appui sur un bouton ou une réponse vocale, Guida et al., 2016 ; van Dijck & Fias, 2011 ; van Dijck et al., 2013) ou implicites (e.g., des mouvements oculaires spontanés, Rinaldi et al., 2015 ; Sahan et al., 2022 ; voir aussi Schroth et al., 2025). En accord avec la théorie utilisant l'analogie du tableau blanc (Abrahamse et al., 2014, 2017), différentes études sur le SPoARC montrent que l'association entre ordre et espace se construit le long d'un *continuum* mental (Antoine et al., 2017 ; Rinaldi

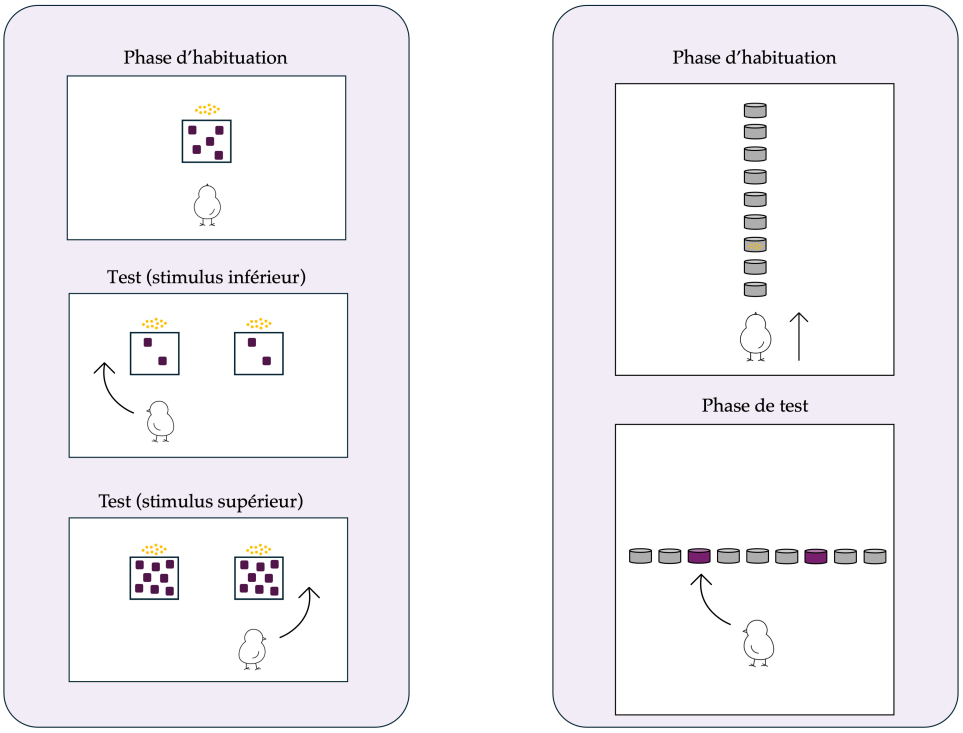
et al., 2015 ; Sahan et al., 2022 ; Schroth et al., 2025), sur lequel l'individu s'appuierait visuellement en mobilisant des processus d'attention interne analogues aux stratégies d'exploration visuo-spatiales recrutées dans l'espace externe (Rasoulzadeh et al., 2021 ; Rinaldi et al., 2015 ; Sahan et al., 2022 ; van Dijck et al., 2013, 2014).

Comme suggéré par différents auteurs, la spatialisation de l'information en mémoire de travail pourrait découler d'expériences sensorimotrices liées aux habitudes de lecture et d'écriture, qui imprégneraient les stratégies attentionnelles recrutées dans le maintien de l'ordre dans une direction gauche-droite chez des individus occidentaux (Abrahamse et al., 2014, 2017 ; Guida et al., 2018b ; Rinaldi et al., 2015). Si cette hypothèse met l'accent sur un façonnement culturel de la spatialisation, il apparaît que des composantes plus précoces, liées à l'expérience visuelle elle-même, pourraient également jouer un rôle déterminant dans la capacité coder l'ordre dans l'espace. Bottini et al. (2016) ont par exemple montré que des individus ayant perdu la vue avant l'âge de trois ans, n'ayant donc possiblement pas pu développer précocement des structures visuospatiales pouvant servir de référence en vue d'un réencodage, ne manifestent pas d'effet SPoARC, à la différence d'aveugles tardifs ou d'individus voyants. Ce type de résultat soulève la question des parts d'inné et d'acquis respectivement impliquées dans le développement de l'effet SPoARC, une question qui fera l'objet de la section suivante.

1.4 De l'inné au culturel : le façonnement de la spatialisation

Un pan substantiel de la littérature suggère que l'être humain pourrait être biologiquement prédisposé à utiliser des représentations spatiales internes pour coder des dimensions conceptuelles abstraites telles que la quantité ou l'ordre sériel. Cette idée que la spatialisation puisse reposer sur des composantes innées est notamment fondée sur des travaux ayant montré l'existence de biais spatiaux rudimentaires chez des espèces animales non humaines. Sur le plan de la cognition numérique, une étude réalisée par Rugani et al. (2015) a par exemple montré une association privilégiée entre quantité et espace chez les poussins. Dans leur étude, les poussins étaient entraînés à faire le tour d'un panneau placé au centre d'une arène expérimentale afin d'y récupérer de la nourriture. Sur ce panneau figuraient cinq formes géométriques de taille identique (voir la Figure 1.4a) que le poussin percevait implicitement à chaque passage. Au bout de 20 essais d'entraînement, ce stimulus d'habituation était remplacé par deux nouveaux panneaux d'apparence identique, situés cette fois ci du côté gauche et du côté droit de l'arène. De manière critique, la valeur numérique associée à ces deux panneaux différait selon la condition expérimentale : dans une première condition, chacun des deux panneaux reflétait une quantité *inférieure* à celle perçue lors de la phase d'habituation

(par exemple, deux carrés). Dans une seconde condition, les deux panneaux reflétaient une quantité *supérieure* (par exemple, huit carrés). La phase de test consistait à mesurer la stratégie exploratoire adoptée par le poussin dans cette nouvelle configuration expérimentale, l'animal pouvant se diriger librement vers le panneau gauche ou le panneau droit pour rechercher de la nourriture. Par le biais de ce protocole, Rugani et al. (2015) ont montré une préférence chez les poussins à se diriger vers le panneau situé à gauche de l'arène lorsque le stimulus test représentait une quantité inférieure à celle du stimulus d'habituation ($2 < 5$). À l'inverse, une tendance significative à favoriser l'exploration du panneau droit était observée lorsque la quantité représentée lors de la phase de test était supérieure à celle perçue lors de la phase d'habituation ($8 > 5$). Cette préférence à associer de petites quantités à la gauche et de grandes quantités à la droite chez l'animal constitue un résultat particulièrement robuste, dans la mesure où ce biais a été observé dans différents travaux menés chez le poussin (e.g., Rugani et al., 2014), chez le macaque (e.g., Rugani et al., 2024), et même chez des espèces non-vertébrées. En s'inspirant du protocole de Rugani et al. (2015), Giurfa et al. (2022) ont par exemple montré qu'un biais orienté de gauche à droite dans le traitement de la quantité s'observe aussi chez des populations d'abeilles.



(A) (B)

Figure 1.4 – Exemple des tâches utilisées dans les études de Rugani et al. (2015) (A) et de Rugani et al. (2010) (B) pour mesurer un biais spatial chez le poussin. *Note.* Le panel gauche (A) montre que le traitement d'un stimulus test inférieur au stimulus d'habituation ($2 < 5$) oriente l'attention du poussin vers le côté gauche de son espace physique, tandis que le traitement d'un stimulus supérieur ($8 > 5$) oriente son attention du côté droit. Le panel droit (B) montre qu'après apprentissage d'une position spécifique sur un axe sagittal (e.g., la troisième boîte en partant du bas), le poussin tend à initier sa recherche du côté gauche de son espace physique pour retrouver la position cible sur un nouvel axe horizontal, le conduisant à privilégier la troisième boîte à partir de la gauche plutôt que celle à partir de la droite (toutes deux colorées en violet sur le graphique). Figures adaptées de Rugani et al. (2015, Fig. 2, p. 535) et de Rugani et Regolin (2020, Fig. 1, p. 36).

Au-delà du traitement de quantités, des biais spatiaux rudimentaires ont également été observés lors du traitement d'informations ordinales chez différentes espèces. En utilisant une tâche de transposition spatiale, Rugani et al. (2010, mais voir aussi Rugani et al., 2007, Exp.2) ont permis d'identifier que des poussins et des cassenoix d'Amérique (une espèce d'oiseau de la famille des Corvidés) tendent à débuter la recherche d'une position cible préférentiellement par la gauche de leur espace physique. Dans leur étude, les oiseaux étaient entraînés à picorer dans un emplacement spécifique parmi une série de 16 bacs parfaitement identiques. Lors de cette phase d'entraînement, les bacs étaient alignés de manière sagittale de sorte que, pour pouvoir picorer, les oiseaux devaient avancer en suivant un axe proximal-distal (voir la Figure 1.4b). Au moment du test, la série subissait une rotation au sol de 90°, de sorte que les boîtes

soient disposées de manière horizontale devant l'animal. Les résultats de cette étude ont montré que les oiseaux tendaient à orienter préférentiellement leur attention vers l'hémichamp gauche de leur espace physique pour initier la recherche de l'élément cible : par exemple, des oiseaux entraînés à picorer dans le sixième bac en partant du bas dans la phase d'habituation tendaient à se diriger significativement plus vers la sixième boîte en partant de la gauche de l'axe horizontal. Par le biais de cette étude, Rugani et al. (2010) ont ainsi montré qu'un biais préférentiellement orienté de gauche à droite tend à s'observer lorsque l'oiseau engage la recherche d'une position sérielle spécifique (pour des résultats similaires, voir l'étude de Rugani et al., 2011 ; et, dans l'objectif de déterminer le rôle de la dominance hémisphérique, les conditions binoculaires de Rugani et al., 2016 ; Rugani & Regolin, 2020). De la même manière, une étude menée par Drucker et Brannon (2014) a mis en évidence un biais spatial orienté de gauche à droite chez des macaques. Ces derniers avaient été entraînés à sélectionner le quatrième ovale d'une série de cinq ovales agencés verticalement sur un écran d'ordinateur. Après cette phase d'entraînement, l'axe vertical était transposé horizontalement, les macaques devant retrouver l'élément cible dans cette nouvelle configuration spatiale. De la même manière que les oiseaux, les macaques tendaient à sélectionner le quatrième élément depuis la gauche de l'axe horizontal, montrant une préférence pour associer le début de la séquence ordinale à la gauche plutôt qu'à la droite de leur espace physique.

Ces données recueillies chez l'animal suggèrent donc l'existence d'une prédisposition biologique à coder des relations quantitatives ou sérielles de manière spatialement déterminée, reflétant un fonctionnement cérébral fondamental partagé phylogénétiquement entre différentes espèces. Cet héritage évolutif contribue à expliquer pourquoi l'être humain manifeste des biais spatiaux préférentiels dès les premiers instants de sa vie. Ces biais préférentiels ont été largement étudiés sur le plan de la cognition numérique : lorsqu'ils expérimentent une diminution de quantité (par exemple, *via* la réduction du nombre de syllabes perçues auditivement ou par la diminution du nombre de formes géométriques qui composent un stimulus visuel), des bébés âgés de quelques jours préfèrent fixer plus longtemps leur espace gauche, tandis qu'une augmentation de quantité tend à générer des biais de fixation du côté droit (de Hevia et al., 2017 ; Di Giorgio et al., 2019). Par le biais d'une tâche adaptée du paradigme de Posner, Bulf et al. (2016) ont montré que la présentation d'une amorce de faible quantité facilite la détection d'une cible présentée du côté gauche chez des nourrissons âgés de quelques mois. de Hevia et al. (2014b) ont également permis d'identifier qu'à cet âge, le bébé préfère traiter des séquences numériques croissantes lorsque celles-ci lui sont présentées de gauche à droite. Dans leur étude, les auteurs ont présenté à des bébés trois panneaux représentant des quantités distinctes lors d'une première phase d'habituation. Pour 50 % des participants, les séquences présentées lors de la phase d'habituation

étaient croissantes (par exemple, des stimuli composés de 9, 18 ou 36 formes rectangulaires), tandis que les 50% restants étaient habitués à traiter des séries décroissantes. Quel que soit le type de progression, les trois panneaux étaient respectivement présentés à gauche, au centre et à droite de l'écran d'ordinateur. Cette configuration spatiale s'avérait ainsi congruente avec un biais gauche-droite pour les séries croissantes (les plus petites quantités étant associées à la gauche et les plus grandes quantités à la droite), et incongruente pour les séries décroissantes. À l'issue de la phase d'habituation, les bébés devaient traiter de nouvelles séries soit croissantes soit décroissantes, mais toujours orientées de la gauche vers la droite. Quel que soit le type d'habituation reçu, les résultats ont montré que les bébés manifestaient davantage d'intérêt pour les séries croissantes lors de la phase de test, malgré le fait qu'elles aient été hautement familières pour 50% des participants. Par ailleurs, la préférence constatée pour les séquences croissantes n'était plus observée lorsque les séries étaient présentées de droite à gauche, révélant une préférence précoce à associer l'augmentation d'une quantité à une direction gauche-droite.

Si de multiples études ont renseigné l'ontogénèse d'un biais lié au traitement des quantités (e.g., de Hevia et al., 2014b, 2017 ; Di Giorgio et al., 2019 ; voir aussi McCrink et al., 2020), des indices issus de la littérature pointent également vers l'existence d'un biais spatial inné spécifiquement lié au traitement de l'ordre sériel. La même étude de de Hevia et al. (2014b) a par exemple montré que les bébés échouaient à apprendre des séquences numériques décroissantes présentées de la droite vers la gauche, malgré le fait que cette configuration soit *in fine* cohérente avec un biais induit par les quantités (de petites quantités étant associées à la gauche et de grandes quantités à la droite). Comme proposé par de Hevia (2021), une telle difficulté avec les quantités décroissantes de droite à gauche traduirait une préférence précoce chez l'enfant à associer des premiers éléments à gauche et des derniers éléments à droite, laquelle s'avérerait indépendante du biais spatial gauche-droite lié à une quantité croissante. Cette préférence gauche-droite se retrouve également lorsque le bébé traite des séquences non numériques : dans une étude de Bulf et al. (2017), des bébés devaient par exemple apprendre des règles simples de type ABB, ou des règles plus complexes de type ABA. La séquence de stimuli à apprendre (ici, des formes géométriques) était manipulée de sorte que la présentation successive des items était réalisée soit de gauche à droite, soit de droite à gauche. Les résultats ont montré que la capacité des bébés à apprendre correctement les deux règles était massivement impactée par le sens de présentation des items : les séquences étaient correctement apprises lorsque les stimuli étaient présentés de la gauche vers la droite, y compris pour des règles complexes de type ABA, habituellement difficiles à acquérir à cet âge dans le cas d'une présentation centrale (Johnson et al., 2009). Inversement, l'apprentissage d'une règle s'avérait impossible lorsque l'ordre de présentation progressait de la droite vers la gauche, même pour des

règles pour lesquelles le bébé ne présente habituellement aucune difficulté (ABB, Johnson et al., 2009). Au-delà de suggérer une prédisposition chez l'enfant à traiter l'ordre d'une séquence dans un sens préférentiel (i.e., en associant des éléments initiaux à la gauche et des éléments plus tardifs à la droite), ces données suggèrent également qu'une présentation spatiale congruente avec cette préférence tend à faciliter l'apprentissage sériel dès les premiers mois de la vie (voir également Bulf et al., 2022 ; Ferguson et al., 2018).

En définitive, de nombreuses études suggèrent l'existence chez l'Homme de prédispositions innées à coder de manière spatiale des relations quantitatives et sérielles (pour des revues, voir de Hevia, 2021 ; Rugani & De Hevia, 2017). Tant chez le jeune enfant que chez l'animal, l'orientation de ce biais spatial inné ne semble pas aléatoire, mais tend à se structurer de manière privilégiée de la gauche vers la droite. Ce sens préférentiel a été interprété par plusieurs auteurs comme le reflet d'un biais attentionnel découlant de la latéralisation cérébrale. Il s'avère en effet que l'hémisphère droit semble dominant dans le contrôle des processus visuospatiaux chez l'être humain (Brooks et al., 2014), et que cet hémisphère pourrait maturer de manière plus précoce que l'hémisphère gauche (Rosen et al., 1987). Cette dominance précoce de l'hémisphère droit prédisposerait ainsi l'enfant à sur-explorer son champ visuel controlatéral dans des tâches visuo-attentionnelles (Kinsbourne, 1970), expliquant par exemple que le côté gauche constitue un point d'ancrage préférentiel dans le balayage visuel d'une série ordinale. Ce biais attentionnel, initialement perceptif, pourrait également s'étendre sur le plan interne, influençant la manière dont les informations sérielles sont mentalement représentées (voir par exemple de Hevia et al., 2012 ; de Hevia, 2021, pour une discussion)[4]. Par ailleurs, si des facteurs biologiques peuvent ainsi conférer à la spatialisation un sens préférentiel initial, la littérature montre que ce phénomène reste hautement flexible et modulable. Des travaux interculturels (présentés plus bas) suggèrent en effet que l'orientation et la stabilité de la spatialisation dépendent de l'expérience et de l'enculturation, la préférence gauche-droite pouvant par exemple être totalement renversée chez des populations dont les habitudes culturelles s'orientent de la droite vers la gauche.

La modulation de la spatialisation en fonction du système de lecture et d'écriture a été mise en évidence dans de nombreux travaux menés chez l'adulte, avec des premières observations empiriques identifiées dans le cas du SNARC. Les études de Zebian (2005) et de Shaki et al. (2009) ont été les premières à rapporter une spatialisation inversée des chiffres chez des participants monolingues habitués à un système de lecture

[4] Le rôle de l'hémisphère droit dans la manifestation d'un biais gauche-droite semble de plus en plus soutenu par la littérature chez l'animal, notamment grâce à des études ayant tenté d'isoler l'implication de l'un ou l'autre des hémisphères par le biais de l'occlusion monoculaire (Rugani et al., 2016 ; Rugani & Regolin, 2020), ou d'une modulation de la lumière prénatale chez des populations aviaires (Rugani et al., 2025).

et d'écriture arabe orienté de droite à gauche (vivant respectivement au Liban et en Palestine). Par ailleurs, l'influence du sens de lecture et d'écriture est également visible pour la spatialisation de l'ordre sériel en mémoire de travail. La première étude ayant tenté de mesurer la variation du SPoARC en fonction de la culture a été réalisée par Guida et al. (2018b). Lors de cette expérimentation, les auteurs ont comparé des égyptiens arabophones et des individus occidentaux d'origine belge et française. Après vérification de la capacité des participants à nommer le matériel utilisé (à savoir des patchs de couleurs rouge, bleu, jaune, vert, rose, orange, noir et blanc), des séquences de quatre patchs leur étaient ensuite présentées en vue d'une mémorisation. Après chaque séquence, les participants réalisaient une tâche de reconnaissance en indiquant par le biais de touches latéralisées si différentes sondes faisaient partie ou non de la série précédemment mémorisée. Consécutivement à cette tâche, il était demandé aux participants de rappeler la séquence encodée dans l'ordre de présentation. L'analyse des résultats a mis en évidence une interaction entre la position de l'item dans la séquence, la latéralité de la réponse et la culture des participants : alors que les réponses des participants occidentaux reflétaient une spatialisation gauche-droite, un SPoARC inversé a été observé chez les individus égyptiens. Ces derniers identifiaient plus rapidement les premiers items de leur main droite et les derniers items de leur main gauche, témoignant d'un agencement mental de l'information sérielle congruent avec leurs habitudes de lecture et d'écriture.

Une deuxième étude plus récente a permis de confirmer cette influence culturelle sur la spatialisation en mémoire de travail, tant sur le plan comportemental que sur le plan neurophysiologique. Rasoulzadeh et al. (2024) ont recruté des participants iraniens parlant le farsi (une langue s'écrivant et se lisant de droite à gauche) et leur ont administré une tâche de spatialisation similaire à l'étude séminale de van Dijck et Fias (2011). Pour solliciter davantage la mémoire de travail verbale, les auteurs ont demandé à leurs participants de mémoriser des séries de cinq noms de fruits et de légumes, présentés dans un ordre aléatoire. Les participants devaient par la suite effectuer une tâche de catégorisation sémantique en Go/No-Go (en indiquant si une sonde était un fruit ou un légume, mais seulement si l'item faisait partie de la série encodée). Confirmant les résultats comportementaux de Guida et al. (2018b), une pente de spatialisation inversée a été observée pour ces participants arabophones, la différence des temps de réponse entre main droite et main gauche augmentant progressivement à mesure que les items traités étaient tardifs dans la série mémorisée. Pour éprouver davantage ces résultats, Rasoulzadeh et al. (2024) ont tenté de déterminer si la récupération des éléments en mémoire de travail selon une orientation droite-gauche faisait appel aux mêmes mécanismes d'attention spatiale que ceux observés chez des lecteurs gauche-droite. Une tâche de détection de cible adaptée du protocole de van Dijck et al. (2013, voir la Figure 1.2a dans la section 1.2) a été proposée dans une seconde expérience. Après

avoir encodé une série de quatre consonnes dans une première phase de mémorisation, les participants devaient détecter le plus rapidement possible une cible présentée aléatoirement soit à gauche, soit à droite de l'écran de l'ordinateur. Conformément à la procédure de van Dijck et al. (2013), la cible à détecter était précédée d'une amorce, qui correspondait soit à un item cible présent dans la séquence, soit à une lettre qui ne faisait pas partie de la série encodée (les participants ne devant répondre que lorsque l'amorce correspondait à un item cible). Les résultats comportementaux observés dans cette étude ont confirmé l'inversion des patterns attentionnels visibles chez des lecteurs occidentaux : contrairement aux résultats de van Dijck et al. (2013) et de van Dijck et al. (2014), la présentation d'un item amorce en début de séquence orientait l'attention des participants non pas vers le côté gauche, mais vers le côté droit de l'écran, facilitant ainsi la détection de cibles présentées à cet endroit. Un pattern inverse était observé pour des amorces en fin de séquence, qui facilitaient la détection de cibles présentées à gauche de l'écran. En complément de ces mesures comportementales, Rasoulzadeh et al. (2024) ont également mesuré l'activité électrophysiologique des participants arabophones au moyen de l'électroencéphalographie (EEG), afin d'examiner les marqueurs neuronaux de l'attention spatiale au cours de la tâche. Ces mesures ont permis de révéler des marqueurs d'attention spatiale de nature similaire à ceux identifiés chez des lecteurs occidentaux, à savoir des potentiels évoqués EDAN (*Early Directing Attention Negativity*) et ADAN (*Anterior Directing Attention Negativity*) dans l'hémisphère controlatéral à la position spatiale *mentale* induite par l'item amorce, accompagnés d'une modulation de l'activité alpha traduisant l'inhibition de l'hémisphère ipsilatéral et l'activation de l'hémisphère controlatéral à cette même position spatiale mentale (voir Rasoulzadeh et al., 2021). Par le biais de cette deuxième étude, Rasoulzadeh et al. (2024) ont permis de confirmer que, chez des individus arabophones, la récupération d'informations verbales en mémoire de travail s'accompagne des mêmes déplacements attentionnels que ceux observés chez une population occidentale, la seule différence résidant dans l'*orientation* du focus attentionnel. En montrant des déplacements d'attention spatiale orientés du côté droit pour des items précoces et du côté gauche pour des items tardifs, cette étude confirme que des individus arabophones codent l'ordre des items sur une ligne mentale inversée, en accord avec leurs habitudes culturelles.

Pour résumer, le phénomène de spatialisation retrouvé dans le cadre du SPoARC semble conjointement influencé par des facteurs biologiques et environnementaux. La littérature montre que des biais spatiaux précurseurs de la spatialisation de l'ordre sériel sont observables à l'échelle phylogénétique (e.g., Drucker & Brannon, 2014 ; Rugani et al., 2007, 2010 ; Rugani & Regolin, 2020) et ontogénétique (e.g., Bulf et al., 2017 ; de Hevia et al., 2014b ; Ferguson et al., 2018), sans déterminants culturels. Ces biais innés, interprétés comme résultant d'une dominance hémisphérique, témoignent d'une prédisposition à coder des relations sérielles dans un sens préférentiel orienté de gauche

à droite. Bien que ces biais biologiques orientent naturellement le codage de l'ordre, les travaux interculturels cités ci-dessus indiquent que cette contrainte biologique n'est pas immuable : les habitudes culturelles d'un individu, largement influencées par le système de lecture et d'écriture, peuvent progressivement remodeler et renverser cette orientation spatiale prédéterminée (Guida et al., 2018b ; Rasoulzadeh et al., 2024). Par ailleurs, la question se pose de savoir si l'acquisition de compétences solides en lecture et en écriture constitue un facteur décisif dans le développement de la spatialisation en mémoire de travail. Une telle question a notamment été soulevée par les travaux de Guida et al. (2018b), qui – en complément des participants lettrés égyptiens et occidentaux – ont examiné le SPoARC chez des participants arabophones illettrés n'ayant jamais été exposés à des activités de lecture et d'écriture. De manière critique, aucun effet n'a pu être observé chez cette population, les participants n'ayant montré aucune propension à coder l'ordre des séries mémorisées selon une orientation horizontale préférentielle. Ainsi, si les biais spatiaux innés identifiés chez le bébé ou l'animal peuvent être considérés comme des précurseurs du SPoARC, ces derniers semblent néanmoins nécessiter une consolidation supplémentaire pour aboutir à la spatialisation complexe de l'ordre sériel observée chez l'adulte. L'absence d'un effet SPoARC chez des individus illettrés a constitué un résultat majeur dans l'élaboration de la théorie de l'expertise (Guida & Campitelli, 2019), laquelle attribue un rôle central à la consolidation de compétences en lecture et en écriture dans le développement du SPoARC.

1.5 Théorie de l'expertise et développement de l'effet SPoARC

Si la littérature sur le SPoARC comporte de nombreuses études expérimentales menées chez l'adulte (voir Guida & Campitelli, 2019, pour une revue ; et Guida et al., 2025, pour une méta-analyse), le développement de cet effet chez l'enfant demeure à ce jour une question peu explorée. À l'époque où ce travail doctoral a débuté, seules deux études avaient tenté d'examiner l'existence d'associations spatio-positionnelles en mémoire de travail chez l'enfant, fournissant des premières données empiriques susceptibles d'éclairer le cadre explicatif de la spatialisation proposé par la théorie de l'expertise (Guida & Campitelli, 2019). Selon cette théorie, la capacité à spatialiser l'information résulterait de l'utilisation de structures de connaissances issues de la mémoire à long terme. Ces structures de connaissances constituent une généralisation des concepts de *structure de rappel*, de *chunk* et de *template* retrouvés dans les théories de la mémoire experte (e.g., Ericsson & Kintsch, 1995 ; Gobet et al., 2001, 2015 ; Gobet & Simon, 1996 ; Gobet, 2000a, 2000b ; pour une revue, voir Guida et al., 2012). Selon Guida et Campitelli (2019, voir aussi Campitelli, 2015), ces structures viendraient soutenir le

traitement et la mémorisation de différentes informations lorsque l'individu interagit avec un matériel pour lequel il possède une expertise. Dans leur revue théorique, Guida et Campitelli (2019) ont proposé que deux types de structures sous-tendraient la spatialisation : des schémas sans *slots* et des schémas avec des *slots*. Les schémas sans slots désignent un ensemble d'éléments individuels regroupés en une seule unité significative (i.e., des chunks, Cowan, 2001 ; Miller, 1956). À titre d'exemple, lorsqu'un joueur d'échec amateur développe peu à peu son expertise, certaines configurations spatiales récurrentes lui seront progressivement familières et se consolideront en un seul chunk. Selon Guida et Campitelli, ce type de structure serait à l'origine du phénomène de spatialisation observé dans le cadre du SNARC : à force d'être confronté à des informations numériques ou alphabétiques constamment présentées dans un ordre similaire (e.g., la séquence 1 à 9, la série A à Z), ces séries ordinales se consolideraient en mémoire à long terme sous la forme d'une unité singulière. Parce que ces séries sont régulièrement traitées spatialement dans l'environnement (graduations d'une règle, frises numériques ou alphabétiques), la valeur spatiale associée aux différents éléments seraient également consolidée en mémoire à long terme. Au moment d'une tâche de type SNARC, l'individu activerait automatiquement le chunk correspondant – ou une partie de celui-ci – et les codes spatiaux associés aux éléments qui le composent généreraient des biais de réponse latéralisés. En ce sens, Guida et Campitelli (2019) supposent que les effets de type SNARC reposent sur une spatialisation issue de la mémoire à long terme, une conception qui rejoint sur plusieurs points la notion de ligne mentale numérique proposée par les auteurs de l'étude princeps (Dehaene et al., 1993).

À mesure qu'il devient plus expert, l'individu développerait par la suite des structures de connaissances plus complexes et plus hiérarchisées. Ces schémas plus complexes (aussi appelés templates, voir Gobet & Simon, 1996) reposeraient sur une structure centrale invariable, constituée de plusieurs emplacements (ou *slots*), chacun pouvant accueillir différents items ou différents chunks de façon flexible. Selon Guida et Campitelli (2019), ce deuxième type de structure sous-tendrait la spatialisation observée dans le cas du SPoARC : au fur et à mesure qu'il acquiert une expertise dans le langage écrit, l'individu développerait une ligne mentale organisée en slots en mémoire à long terme. Lors de la mémorisation, cette ligne mentale serait automatiquement activée en mémoire de travail comme un canevas vide, favorisant l'encodage sériel des séries mémorisées (chaque emplacement sur la ligne mentale s'apparentant à un marqueur de position). De la même manière qu'Abrahamse et al. (2014, 2017) et que van Dijck et al. (2011, 2014), Guida et Campitelli (2019) attribuent l'effet SPoARC à une spatialisation émergeant en mémoire de travail[5]. À la différence de ces auteurs cependant,

[5] Il convient de noter que la théorie de l'expertise proposée par Guida et Campitelli (2019) se limite à rendre compte du SPoARC *horizontal* (qui constitue par ailleurs l'objet d'étude principal de cette thèse). Néanmoins, des travaux réalisés par Hartmann et al. (2021) ont montré que l'effet SPoARC s'observe également sur un axe vertical : lorsque les participants doivent catégoriser des items

Guida et Campitelli (2019) considèrent que ce mécanisme diffère fondamentalement de celui retrouvé dans l'effet SNARC, qui reposerait selon eux sur une spatialisation moins sophistiquée et cristallisée en mémoire à long terme. Parce que les schémas sans slots précèdent chronologiquement l'acquisition de schémas avec des slots dans les théories de l'expertise mnésique (Gobet & Simon, 1996), le cadre explicatif proposé par Guida et Campitelli (2019) laisse ainsi envisager des trajectoires différentes dans le développement du SNARC et du SPoARC chez l'enfant, le SPoARC ne devant émerger, selon Guida et Campitelli (2019), qu'à la suite d'un apprentissage formel de la lecture et de l'écriture.

Une première étude menée par van Dijck et al. (2020) a tenté de préciser l'influence d'une expertise dans le langage écrit sur le développement de la spatialisation en mémoire de travail en examinant l'effet SPoARC chez une population pré-lettrée. Pour cause, si l'absence du SPoARC observée par Guida et al. (2018b) chez des individus illettrés semble indiquer l'importance des activités de lecture et d'écriture dans l'émergence du phénomène, ce type de population peut également manquer d'expériences culturelles précoces, lesquelles contribuent à imprégner la direction du système scriptural dans les habitudes de l'individu. Cette enculturation précoce peut, par exemple, être véhiculée par les parents et les proches de l'enfant avant même l'entrée à l'école : des gestuelles en accord avec le sens de lecture et d'écriture sont retrouvées dans la manière dont les parents agencent des illustrations pour former une histoire ou pointent des séries d'images pour soutenir une explication verbale (McCrink et al., 2018). La lecture partagée constitue également un contexte susceptible de renforcer l'ancrage d'une directionnalité propre au système scriptural, depuis la manière dont les parents tournent les pages d'un livre ou suivent du doigt le texte lu à l'oral ; jusqu'à l'organisation même des images, où le sujet est fréquemment dessiné à gauche et l'objet à droite dans le système occidental (Göbel et al., 2018). Si l'étude d'une population illettrée ne permet pas de distinguer clairement l'influence de l'apprentissage formel du langage écrit de celle des expériences culturelles précoces sur le développement du SPoARC, l'âge préscolaire constitue un stade propice pour mieux différencier ces influences (dans

dans une tâche Go/No-Go en orientant leur regard vers la partie supérieure ou inférieure d'un écran d'ordinateur, les premiers items d'une séquence génèrent des saccades oculaires plus rapides vers le haut, tandis que les items en fin de séquence génèrent des saccades plus rapides vers le bas. Ce codage du haut vers le bas n'est pas sans rappeler la manière dont l'individu parcourt verticalement une page lors des activités de lecture et d'écriture (i.e., en démarrant en haut et en progressant vers le bas). Cette direction s'oppose par ailleurs à l'orientation de l'effet SNARC lorsque celui-ci est mesuré sur ce même continuum, des petits nombres étant préférentiellement spatialisés vers le bas et des grands nombres vers le haut (e.g., Aleotti et al., 2020 ; Hartmann et al., 2012 ; Schwarz & Keus, 2004 ; Winter & Matlock, 2013), en accord par exemple avec la manière dont l'individu empile des objets (le principe de gravité imposant que toute accumulation soit ancrée vers le bas). Au-delà de suggérer que ces deux effets pourraient effectivement correspondre à des mécanismes distincts, l'examen du SPoARC sur le plan vertical met en lumière le lien privilégié qu'entretient ce phénomène avec les habitudes de lecture et d'écriture, renforçant d'autant plus la notion d'expertise proposée par Guida et Campitelli (2019).

la mesure où l'enfant, bien que non lettré, a bénéficié de ce bain culturel au cours de son développement). Pour renseigner le rôle de l'expertise dans l'émergence de la spatialisation, van Dijck et al. (2020) ont ainsi recruté des participants âgés de cinq ans, qui n'avaient été sensibilisés qu'à des activités prélittéraires (telles que la reconnaissance des lettres, la reconstruction d'histoires à partir d'images et la manipulation de livres). Les auteurs ont proposé à ces participants une tâche de spatialisation similaire à celle habituellement employée chez l'adulte : dans une première phase de mémorisation, les enfants devaient encoder des séries de trois images colorées référant à des objets familiers ou à des animaux. Par la suite, les enfants devaient exécuter une tâche de reconnaissance par réponse tactile. Lors de cette phase, deux images (une cible et un leurre) étaient présentées à gauche et à droite de l'écran, les enfants devant sélectionner le plus rapidement possible l'image qui appartenait à la séquence mémorisée en utilisant leur main dominante. Les participants devaient enfin reconstituer la séquence mémorisée dans le bon ordre en disposant devant eux des cartes correspondant aux items présentés. Sous l'hypothèse d'une spatialisation orientée de gauche à droite, il était attendu que les enfants soient plus rapides pour sélectionner des images en première position lorsqu'elles étaient situées à gauche de l'écran, et inversement pour des images en dernière position. Par le biais de cette manipulation expérimentale, van Dijck et al. (2020) n'ont pas permis d'identifier une modulation significative des temps de réponse en fonction de l'emplacement des items et de la position dans la séquence, suggérant que le SPoARC n'est pas encore visible à l'échelle du groupe à ce stade du développement[6]. En montrant que la plupart des enfants d'âge préscolaire ne tendent pas à présenter une spatialisation horizontale similaire à celle observée chez l'adulte, les travaux de van Dijck et al. (2020) suggèrent que des expériences culturelles précoces contribuant à imprégner la direction du système scriptural ne constituent pas un facteur suffisant pour générer des associations spatio-positionnelles de type gauche-droite en mémoire de travail. Ce résultat s'oppose aux travaux réalisés dans le cadre du SNARC, qui montrent qu'une spatialisation de l'information numérique est détectable

[6] Les auteurs ont néanmoins investigué la présence d'une spatialisation à l'échelle individuelle par le biais d'une analyse bootstrap. Déjà éprouvée dans le cadre du SNARC (Cipora et al., 2019), cette méthode statistique permet de calculer un intervalle de confiance des coefficients de régression de la différence des temps de réponse entre main droite et main gauche pour chaque participant. Pour rappel, le SPoARC est communément associé à un coefficient de régression négatif, traduisant un avantage progressif de la main droite à mesure que l'item est tardif dans la séquence. Par le biais du bootstrap, il est possible de simuler le calcul de pentes de spatialisation artificielles au moyen de multiples rééchantillonnages, permettant d'identifier si un individu présente *i)* une spatialisation fiable orientée de gauche à droite (l'intervalle de confiance de la pente empirique comprenant uniquement des valeurs négatives), *ii)* une spatialisation fiable orientée de droite à gauche (l'intervalle de confiance comprenant uniquement des valeurs positives), ou encore *iii)* aucune spatialisation (l'intervalle de confiance de la pente comprenant la valeur zéro, voir la partie Bootstrap de l'Expérience 5 dans le Chapitre 3 pour une explication plus détaillée). L'analyse réalisée par van Dijck et al. (2020) à l'échelle individuelle a ainsi permis d'identifier quelques spatialiseurs précoces dans l'échantillon, lesquels ne présentaient par ailleurs aucune orientation privilégiée. Sur les 36% de spatialiseurs identifiés dans cette étude, la moitié avait codé la série d'items de la gauche vers la droite, tandis que l'autre moitié avait spatialisé les items

dès l'âge préscolaire par le biais de tâches similaires à l'adulte impliquant une mesure des temps de réponse (entre cinq et six ans, Hoffmann et al., 2013 ; Ramos et al., 2026) ; et est identifiable plus précocément encore par le biais de tâches simplifiées (entre trois et cinq ans, Opfer et al., 2010 ; Shaki et al., 2012 ; Thevenot et al., 2018). En accord avec la théorie de l'expertise, les résultats de van Dijck et al. (2020) suggèrent que le SPoARC tendrait à se manifester plus tardivement que le SNARC.

Pour renseigner de manière plus précise le stade d'émergence de l'effet SPoARC, Guida et al. (2020b) ont réalisé une étude impliquant un éventail plus large d'âges développementaux. Les auteurs ont recruté des participants d'âge préscolaire en dernière année de maternelle, ainsi que des participants d'âge scolaire de la première à la dernière année de l'école élémentaire (i.e, du CP au CM2). À la différence de van Dijck et al. (2020), Guida et al. (2020b) ont proposé à leurs participants un protocole simplifié dans le but de mesurer la spatialisation. Ce protocole – nommé « paradigme de la grotte » par les auteurs – consistait en une tâche informatisée décomposée comme suit : dans une première phase de mémorisation, les participants encodaient deux noms d'animaux (par exemple « chat » et « chien ») présentés en modalité auditive. Suite à cette phase d'encodage, les participants devaient rappeler la série dans le bon ordre. En cas de réponse correcte, deux grottes étaient présentées, du côté gauche et du côté droit de l'ordinateur (voir la Figure 1.5). Ces deux grottes étaient associées à un fond coloré (par exemple, un fond rouge pour la grotte de gauche et un fond bleu pour la grotte de droite, contrebalancé entre les participants). Il était annoncé aux enfants que les deux animaux mémorisés précédemment se cachaient dans ces grottes, chaque animal ayant sa propre cachette. Par la suite, un nom d'animal était annoncé à l'oral, et le participant devait indiquer la couleur de la grotte dans laquelle il pensait que l'animal était caché. Les participants devaient enfin rappeler une dernière fois la série mémorisée pour mettre fin à l'essai, cette procédure étant répétée trois fois pour chaque participant. Pour mesurer la spatialisation, Guida et al. (2020b) ont recensé le nombre d'essais lors desquels les participants avaient répondu de manière congruente avec un biais orienté de gauche à droite (c'est à dire, en associant un animal en première position à la grotte située du côté gauche, et un animal en deuxième position à la grotte du côté droit). Les patterns obtenus dans les différents groupes d'âges ont été comparés aux performances de participants adultes, afin de déterminer l'âge à partir duquel les réponses des enfants se conformaient à celles de ce groupe de référence. Confirmant premièrement les résultats de van Dijck et al. (2020), les résultats obtenus pour les enfants d'âge préscolaire n'ont pas montré une tendance significative à associer les premiers éléments à la gauche et les seconds éléments à la droite. Ce n'est qu'à partir

de la droite vers la gauche. Ainsi, si des marqueurs de positions semblent pouvoir être recrutés par une minorité d'enfants à un âge précoce, le codage systématique de l'information mémorisée sur une ligne mentale orientée de gauche à droite ne semble pas encore clairement établi au stade préscolaire.

de la troisième année de l'école élémentaire (CE2) que les réponses des participants différaient significativement du hasard, et concordaient avec les réponses obtenues chez les participants adultes. Dans le système scolaire Français, le CE2 constitue le dernier stade du Cycle des apprentissages élémentaires (Cycle 2), lors duquel l'enfant réalise un apprentissage intensif de la lecture et de l'écriture. À l'issue de ce cycle, il est attendu que les élèves sachent couramment lire et écrire de manière autonome, marquant le passage vers une automatisation du langage écrit (Ministère de l'Éducation nationale, 2020). En identifiant le SPoARC à un âge où l'enfant tend à maîtriser ces compétences, Guida et al. (2020b) ont permis de renforcer l'idée que le langage écrit puisse favoriser l'émergence d'associations spatio-positionnelles en mémoire de travail, en accord avec la théorie de l'expertise proposée par Guida et Campitelli (2019).

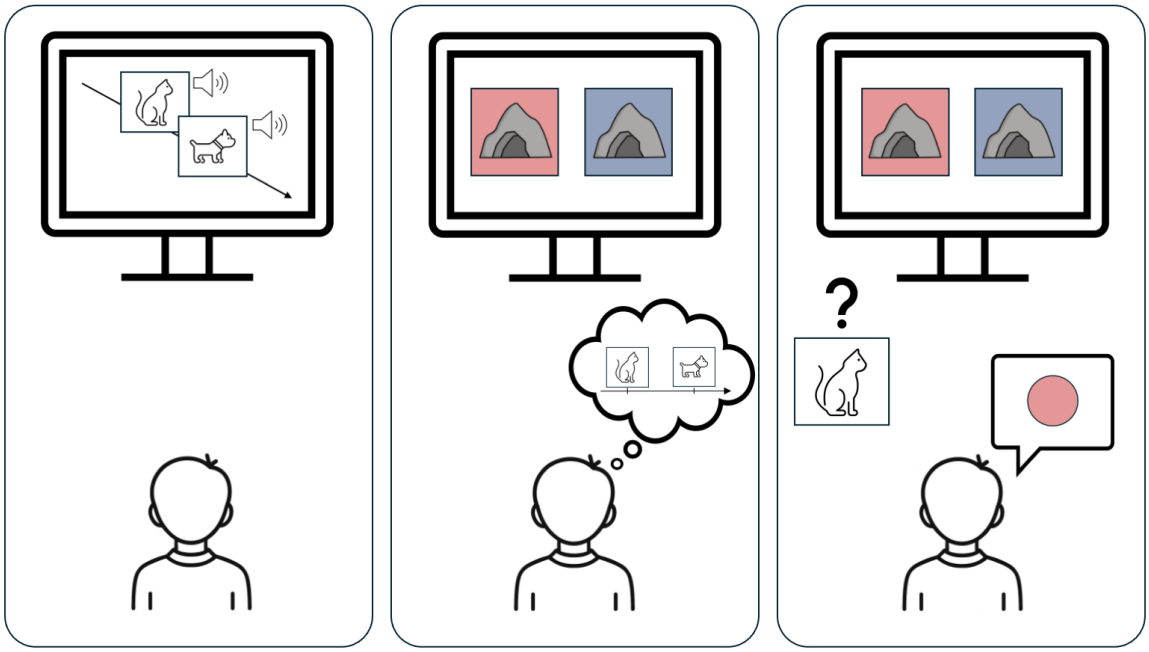


Figure 1.5 – Paradigme de la grotte utilisé par Guida et al. (2020b) pour mesurer la spatialisation chez l'enfant. *Note.* Dans ce paradigme, le participant doit d'abord encoder deux noms d'animaux présentés en modalité auditive (par exemple, « chat » et « chien »). Par la suite, deux grottes colorées sont affichées à gauche et à droite de l'écran d'ordinateur. Le participant doit indiquer la couleur de la grotte dans laquelle il pense qu'un animal cible (par exemple, « chat ») est dissimulé. Sous l'hypothèse d'une association entre ordre et espace orientée de gauche à droite, il est attendu que le participant sélectionne préférentiellement la grotte de gauche pour l'item « chat », du fait que cet item est placé en première position dans la séquence mémorisée.

Ainsi, bien que de meilleures performances en mémoire de travail puissent en partie prédire la réussite en lecture et en écriture (Alloway & Alloway, 2010 ; De Vita et al., 2021 ; Gathercole et al., 2006 ; Nevo & Breznitz, 2011, 2013 ; Nevo & Bar-Kochva, 2015), notamment en ce qui concerne la mémorisation de l'ordre sériel (Magro et al., 2021 ; Perez et al., 2012), il semblerait que la pratique répétée de ces activités puisse,

en retour, contribuer à façonner le fonctionnement de la mémoire de travail. Une telle idée a déjà été avancée par Demoulin et Kolinsky (2016), qui proposaient que l'entrée dans la lecture contribuerait à renforcer l'utilisation de stratégies mnésiques telles que le recodage phonologique (la traduction systématique des graphèmes en phonèmes pendant le décodage pouvant, par transfert, encourager l'utilisation de codes verbaux au détriment d'un simple codage visuel des items dans des tâches de mémoire de travail, Bourdin, 2007 ; Palmer, 2000a, 2000b) et la répétition articulatoire (de par un entraînement intensif à maintenir et répéter temporairement une chaîne de phonèmes dans le bon ordre pour procéder à la lecture d'un mot, Ellis, 1990 ; Wagner et al., 1994). Selon Demoulin et Kolinsky (2016), ce lien privilégié tend à expliquer pourquoi les stratégies d'autorépétition verbale deviennent particulièrement visibles à un âge où l'apprentissage de la lecture est intensif (i.e., aux alentours de sept ans, Gathercole et al., 1994 ; Gathercole, 1998 ; Henry et al., 2012 ; bien que l'enfant puisse recourir à ce type de stratégie à un âge bien plus précoce lorsqu'il y est invité, voir Attout & Monnier, 2023 ; Miller et al., 2015). De la même manière, les activités de lecture et d'écriture pourraient contribuer à renforcer l'ancrage spatial de l'ordre sériel en mémoire. L'entraînement intensif à traiter visuellement des unités séquentielles (lettres, syllabes ou mots) en progressant systématiquement de la gauche vers la droite tout en les maintenant activement en mémoire pourrait, par transfert, conduire le système cognitif à internaliser cette correspondance sérielle et spatiale au point qu'elle devienne implicite et généralisée au traitement de toute information sérielle en mémoire.

Pour résumer, peu d'études ont jusqu'ici permis de décrire le développement de la spatialisation en mémoire de travail, en dépit d'une large réplication de cet effet chez l'adulte. Par le biais de la tâche canonique utilisée pour examiner l'effet SPoARC (i.e., mesurant une variation de temps de réponse en fonction des items mémorisés), van Dijck et al. (2020) n'ont pas permis d'observer une tendance générale à la spatialisation chez l'enfant scolarisé en fin de maternelle. Il sera toutefois noté que le protocole utilisé par les auteurs, impliquant la mémorisation de trois items suivi d'une tâche de reconnaissance par réponse tactile, opposant de surcroît à chaque essai un leurre et un stimulus appartenant à la séquence mémorisée (pouvant provoquer une plus grande variation des temps de réponse, du fait que le leurre peut capturer l'attention en premier), n'a en réalité jamais été éprouvé chez une population adulte. À l'initiation de ce travail doctoral, aucune étude n'avait par conséquent fait encore usage d'un protocole fondé sur les temps de réponse pour examiner la spatialisation chez l'enfant à des âges plus avancés[7]. Grâce au paradigme de la grotte, qui simplifie le protocole habituel (i.e., celui

[7] Il convient de noter qu'une étude récente réalisée par Moorkens et al. (2025) a permis d'apporter des résultats sur cette question en mesurant la spatialisation dans différents groupes d'âges par le biais d'une étude similaire à celle de van Dijck et al. (2020). La Discussion Générale de cette thèse proposera une analyse de ces travaux et tentera de préciser en quoi les résultats de nos études complètent ou diffèrent de ceux rapportés par Moorkens et al. (2025).

impliquant a minima deux étapes : mémorisation et test de reconnaissance chronométré) par la présentation d'indices visuels (deux grottes à gauche et à droite de l'écran) et par la réalisation d'un choix spatial explicite (une assignation volontaire d'un item à une grotte spécifique), Guida et al. (2020b) ont montré des réponses congruentes avec une spatialisation orientée de gauche à droite à partir du CE2, âge à partir duquel l'enfant tend à automatiser le langage écrit. Pourtant, la question demeure concernant la réplication de ce résultat par un protocole plus proche de celui utilisé habituellement chez l'adulte (permettant non seulement la mesure d'un recodage spatial implicite de l'information mémorisée, mais également un chronométrage). De plus, si les résultats de Guida et al. (2020b) suggèrent une relation entre langage écrit et spatialisation en mémoire de travail, aucune étude n'a encore permis de clarifier ce lien, laissant les mécanismes sous-tendant le développement du SPoARC encore largement méconnus. L'intérêt global de cette thèse sera donc d'examiner le SPoARC à différents stades du développement, à l'aide de différentes approches expérimentales, afin de mieux caractériser la trajectoire du phénomène et les facteurs impliqués dans cette trajectoire. Ce travail expérimental sera décliné en trois volets de recherche décrits dans la section suivante.

1.6 Présentation des chapitres expérimentaux

La question du développement de la spatialisation en mémoire de travail sera abordée dans trois chapitres expérimentaux, répondant à des objectifs complémentaires mais s'appuyant sur des protocoles expérimentaux distincts. Un premier volet expérimental (correspondant au Chapitre 2) s'inspirera des études ayant tenté de mettre en évidence un biais spatial élémentaire chez des populations non-verbales ou préverbales, afin de préciser la manière dont ce biais évolue au cours du développement. Plus précisément, nous ferons usage d'un paradigme de transposition spatiale (e.g., Drucker & Brannon, 2014 ; Rugani et al., 2010) pour mesurer les prémisses de la spatialisation en mémoire de travail. Pour rappel, ce paradigme implique la mémorisation d'une position cible au sein d'un référentiel spatial (par exemple, un axe vertical), que le participant doit ensuite relocaliser au sein d'un référentiel horizontal. Comme présenté dans cette introduction, ce paradigme a montré la présence d'un biais orienté de gauche à droite chez l'animal, mettant en évidence une tendance innée à coder l'information sérielle dans un sens préférentiel. De manière critique, peu d'études ont encore fait usage d'un tel protocole pour mesurer ce type de biais spatial chez l'enfant. Une étude menée par McCrink et al. (2017) a par exemple montré qu'entre deux et trois ans, la manifestation de ce biais est liée au type de label utilisé pour encoder l'ordre des emplacements pendant la tâche : tandis qu'un biais spatial est observable lorsque l'information est reliée à des labels alphanumériques (i.e., « Boîte 1 » ou « Boîte A »),

aucune préférence gauche-droite n'est observée lorsque l'information est encodée par des labels sériels plus abstraits (i.e., « cette boîte », soit une condition plus proche de l'encodage « neutre » proposé dans les études chez l'animal). Si ce résultat pourrait suggérer l'extinction d'un biais gauche-droite biologiquement déterminé (qui laisserait supposément place à un biais spatial de nature culturelle par la suite, McCrink et al., 2017 ; McCrink & de Hevia, 2018 ; West & McCrink, 2021, voir l'introduction du Chapitre 2 pour une explication plus détaillée), la réémergence et la stabilité de ce biais au cours du développement restent des questions encore peu renseignées (West & McCrink, 2021). Quatre expérimentations tenteront ainsi de préciser la trajectoire de ce biais spatial élémentaire en examinant sa présence de l'âge préscolaire à la fin de la scolarité élémentaire, en comparaison à une population adulte. Il s'agira principalement de renseigner si l'entrée dans des activités de lecture et d'écriture constitue un pré-requis nécessaire pour qu'une information sérielle implicite (i.e., codée en l'absence de labels alphanumériques) soit traitée préférentiellement de gauche à droite ; ou si des expériences culturelles antérieures favorisent l'expression de ce biais spatial à un âge plus précoce.

Un deuxième volet expérimental (correspondant au Chapitre 3) visera à examiner le développement du SPoARC en faisant usage d'un paradigme expérimental fondé sur la mesure de temps de réaction. L'objectif global de ce chapitre sera premièrement de corroborer le stade d'émergence identifié par Guida et al. (2020b), à l'aide de conditions expérimentales similaires à l'adulte. Pour cause, la question de savoir si la spatialisation en mémoire de travail opère de manière spontanée dès le milieu de l'école élémentaire demeure ouverte. Nous tenterons ainsi de déterminer si le SPoARC est visible à cet âge dans une tâche ne prodiguant aucune facilitation visuelle (les items étant mémorisés de manière séquentielle au centre d'un écran d'ordinateur) et en l'absence de tout rappel explicite de l'ordre sériel à l'issue de la mémorisation. Après une première étude destinée à isoler un protocole expérimental optimal chez l'adulte (Expérience 5), deux expériences examineront la manifestation du SPoARC chez l'enfant d'âge scolaire par le biais du protocole expérimental retenu. Au-delà de préciser l'âge auquel la spatialisation en mémoire de travail se manifeste chez l'enfant de façon comparable à l'adulte, l'examen du SPoARC par le biais de ce protocole permettra également de fournir une mesure quantitative de la spatialisation. Là où le paradigme de la grotte de Guida et al. (2020b) ne permet par exemple qu'une classification binaire des participants selon la présence ou l'absence d'une spatialisation, cette approche plus canonique permet l'estimation d'un coefficient de régression à l'échelle individuelle. Cette mesure quantitative présente l'avantage d'apprécier non seulement l'orientation, mais aussi la magnitude de l'effet pour chaque participant. En permettant une discrimination plus fine des individus selon leur spatialisation, ces indices quantitatifs s'avèrent cruciaux pour la détection des facteurs impliqués dans le développement de l'effet au fil de

l'âge, une question qui constituera le second objectif du Chapitre 3. Là où la théorie de l'expertise semble prédire un lien direct entre spatialisation et langage écrit, un tel lien n'a jamais été clairement établi dans la littérature. Nous tenterons ainsi de mieux éprouver cette hypothèse en examinant si la capacité à spatialiser l'information peut être liée à de meilleures performances dans des activités de lecture et d'écriture chez l'enfant. Par ailleurs, si la spatialisation est préférentiellement liée au langage écrit, le développement de ce phénomène pourrait également s'avérer dépendant de la maturation même de la mémoire de travail. Nous tenterons donc de déterminer si un lien entre spatialisation et capacité mnésique verbale peut être identifié chez l'enfant, là où des études chez l'adulte ont pu rendre compte d'une relation positive entre ces deux composantes (des individus spatialisant davantage l'information tendant à présenter également de meilleures capacités à court terme verbales, notamment dans la mémorisation de l'ordre sériel, Tian & Fischer-Baum, 2025 ; van Dijck et al., 2022). Nos études viseront ainsi à déterminer si un tel lien se retrouve chez une population plus jeune, ou si, à l'inverse, le SPoARC tend préférentiellement à se manifester chez des enfants présentant une plus faible capacité mnésique (un résultat susceptible d'éclairer le rôle fonctionnel de la spatialisation).

Un dernier volet (correspondant au Chapitre 4) proposera d'examiner le SPoARC par une approche expérimentale alternative, fondée sur la répétition d'une même information sérielle au cours d'une tâche de spatialisation. Il s'agira plus précisément de rendre compte de l'évolution de l'effet lorsqu'une séquence unique se consolide progressivement en mémoire, là où les études sur le SPoARC reposent communément sur une variation systématique des séries mémorisées à chaque essai. Cette approche alternative, inspirée des études portant sur l'effet de répétition de Hebb[8] (1961) visera à répondre à différents objectifs de recherche. Sur le plan méthodologique, il s'agira de déterminer si un paradigme répété peut constituer une condition optimale à la détection d'un SPoARC chez l'enfant. Pour cause, le traitement répété d'une même information pourrait conduire à un renforcement temporaire des liens entre les items et leurs marqueurs de position, favorisant la mesure d'effets plus saillants au début de l'apprentissage (là où, au contraire, la mise à jour constante de l'information spatialisée induite par une variation des séquences à chaque essai pourrait conduire à des effets plus disparates chez l'enfant). Sur le plan théorique, l'examen du SPoARC au cours d'un paradigme répété visera à mieux caractériser l'aspect fonctionnel du phénomène,

[8] Cet effet de répétition rend compte de la manière dont la mémorisation d'une série d'éléments s'améliore progressivement lorsqu'elle est codée de multiples fois. Dans le protocole classique (e.g., Hebb, 1961 ; Musfeld et al., 2023, 2024 ; Norris et al., 2018 ; Page et al., 2013 ; Smalle et al., 2016, 2018 ; Szmalec et al., 2009), une séquence cible (appelée séquence Hebb) communément répétée tous les N essais est interposée avec des séquences aléatoires intercalées (appelées séquences *filler*). Tandis que la performance pour les séquences filler reste stable, le rappel de la série Hebb tend à s'améliorer au cours de la répétition, traduisant un apprentissage implicite de la série (la répétition étant communément réalisée à l'insu du participant).

une question qui demeure encore peu examinée par la littérature. En effet, il reste à déterminer si le SPoARC tend à refléter un mécanisme général permettant de coder l'ordre en mémoire de travail (impliquant que l'usage de marqueurs positionnels de nature spatiale soit effectué de manière automatique pour traiter toute information sérielle), ou si la spatialisation constitue un mécanisme compensatoire préférentiellement recruté pour soutenir temporairement la mémorisation lorsque le système mnésique atteint ses limites. Si la première hypothèse anticipe la pérennité de l'effet en utilisant des informations répétées, l'hypothèse fonctionnelle suppose que la spatialisation disparaisse lorsqu'une information sérielle devient familière (et par conséquent, moins coûteuse) pour le système cognitif (ce qui n'est pas contradictoire avec le fait que la répétition puisse temporairement conduire à des effets plus robustes lors des premières répétitions, comme proposé plus haut). Pour finir, plusieurs indices issus de la littérature convergent vers l'idée que la spatialisation pourrait favoriser l'apprentissage et la consolidation mnésique. Chez le nourrisson, l'information sérielle tend à être mieux apprise lorsqu'elle concorde physiquement avec une préférence gauche-droite innée (e.g., Bulf et al., 2017 ; de Hevia et al., 2014b). D'autres études, menées auprès d'adultes et d'enfants d'âge préscolaire, ont montré que la capacité d'apprentissage et de rappel d'informations sérielles est significativement meilleure lorsque la séquence est codée spatialement dans le sens de lecture et d'écriture (i.e., de gauche à droite pour les américains et de droite à gauche pour les israéliens, bien que ce bénéfice semble limité aux séquences associées à des informations ordinales extrêmement familières telles que des lettres de l'alphabet, McCrink et al., 2014 ; McCrink & Shaki, 2016). Dans la méthode des lieux, l'ajout volontaire d'une dimension spatiale à l'information encodée contribue à optimiser le rappel de cette information, que ce soit pour des performances à court terme (McCabe, 2015 ; Wagner et al., 2021) ou lors d'un rappel plus différé (Wagner et al., 2021 ; Werner-Seidler & Dalgleish, 2016). Pour ces raisons, les études du Chapitre 4 tenteront d'examiner à titre exploratoire le lien entre le SPoARC et l'apprentissage, afin de déterminer si une spatialisation de l'information au stade initial de l'apprentissage permet de mieux consolider cette information en mémoire à long terme. En éclairant le gain potentiel lié à l'application d'une spatialisation sur la consolidation, nos résultats pourraient, à terme, s'avérer pertinents pour améliorer l'apprentissage sériel chez l'enfant.

Chapitre 2

Spatialisation élémentaire de l'information ordinale

Les quatre expériences de ce chapitre ont fait l'objet d'une publication scientifique dans la revue *Journal of Experimental Child Psychology* (Vivion*, Ftaïta*, Guida & Mathy, 2025a)[1].

2.1 Introduction **42**
2.2 Expérience 1 . . . . . **47**
2.3 Expérience 2 . . . . . **62**
2.4 Expérience 3 . . . . . **71**
2.5 Expérience 4 . . . . . **80**
2.6 Discussion générale intermédiaire **97**

[1] Ces expérimentations ont également été présentées à l'occasion des conférences suivantes : *Collectif Cognitif* (2024), *65th Annual meeting of the Psychonomic Society* (2024), *1er Congrès International « Éducation et Sciences Cognitives »* (2025) ; ainsi qu'à l'occasion d'une communication invitée à l'Université de Ghent en Belgique (2025).

2.1 Introduction

Le Chapitre 1 a permis de définir les contours de la spatialisation, reflétant des associations spatio-positionnelles qui peuvent émerger en mémoire. Le peu d'études que nous avons relatées ayant tenté de mettre en évidence une spatialisation en mémoire chez l'enfant suggère que ce type d'associations n'est observable qu'à un stade avancé du développement. En effet, le SPoARC n'a pas pu être détecté de manière consistante chez des enfants d'âge préscolaire par le biais du paradigme classique impliquant une phase de mémorisation, de reconnaissance et de rappel sériel (van Dijck et al., 2020). À l'aide du paradigme de la grotte, Guida et al. (2020b) ont pu montrer qu'une séquence de deux items en mémoire tend à être spatialement codée sur un continuum gauche-droite à partir de la troisième année de l'école élémentaire. Là où ce stade d'apparition tardif pourrait impliquer un niveau d'expertise avec la lecture-écriture, une autre explication concerne la nature de ce type de tâches. Dans ces études, la spatialisation repose uniquement sur un processus de recodage interne lié à la sollicitation de la mémoire. Néanmoins, il est possible qu'un paradigme simplifié puisse révéler une spatialisation plus élémentaire à un stade plus précoce du développement. La simplification du paradigme que nous proposons dans la présente étude consistera à introduire une information spatiale dans le matériel lui-même, afin d'induire un recodage spatial en mémoire.

Le paradigme de *transposition spatiale* pourrait offrir une approche pertinente pour analyser un type de spatialisation ordinale plus fondamentale chez l'enfant. D'abord utilisé pour étudier les biais spatiaux chez l'animal (Drucker & Brannon, 2014 ; Rugani et al., 2010), ce paradigme consiste en la mémorisation de la position d'un item placé au sein d'un référentiel vertical (ou sagittal, en fonction du protocole et du matériel utilisé). Pour tester la spatialisation, il est demandé au participant de retrouver la position cible après la transposition du référentiel vertical à l'horizontale. Dans le cas d'une spatialisation orientée de gauche à droite, il est attendu que la position cible soit retrouvée en prenant comme point d'ancrage la gauche de l'axe (la deuxième position en partant du bas de l'axe vertical correspondant à la deuxième position en partant de la gauche sur l'axe horizontal). Ce type de paradigme partage une caractéristique commune avec les tâches de type SPoARC, à savoir la nécessité de mémoriser puis de retrouver un item lié à une position spécifique au sein d'une séquence. Pour le SPoARC, la dimension spatiale de cette position est entièrement issue d'une représentation abstraite, temporairement construite en mémoire de travail (i.e., l'axe mental horizontal[2]).

[2] Nous nous focalisons ici sur le continuum horizontal qui est central dans cette thèse, mais un nombre substantiel de travaux montrent que le traitement de l'ordre en mémoire peut également reposer sur un continuum vertical (e.g., Hartmann et al., 2021) ou même sagittal (Attout et al., 2025).

Dans le paradigme de transposition, le traitement spatial de l'information ordinale découle de la perception : le participant encode la position de l'item cible au sein d'un référentiel externe, d'abord orienté verticalement. Le marqueur spatial assigné à l'information mémorisée présente donc un caractère tangible dès l'encodage. Lors de la phase de test, l'information spatiale mémorisée doit être utilisée par le participant, qui doit relocaliser spatialement la position de l'item cible, mais cette fois-ci au sein d'un référentiel horizontal. En d'autres termes, le paradigme SPoARC classique vise à évaluer *i)* la construction en mémoire d'un axe mental permettant de coder la position des items et *ii)* la direction (supposément de gauche à droite sur cet axe mental) d'une recherche sérielle d'un item qui doit être retrouvé en mémoire – et ce sans qu'aucun référentiel externe ne soit disponible pendant la tâche. Par contraste, le paradigme de transposition offre un référentiel externe (i.e., l'axe horizontal est matérialisé dans l'espace physique du participant) qui devrait permettre de détecter plus facilement un codage interne gauche-droite de l'information spatiale quand celle-ci est appliquée à ce repère externe.

Le caractère perceptif du paradigme de transposition pourrait donc constituer une forme de simplification permettant d'observer le phénomène à un âge plus précoce. Il est à noter que cette simplification basée sur des informations visuelles avait déjà pu être proposée dans le paradigme de la grotte développé par Guida et al. (2020b). Dans leur protocole, deux emplacements étaient présentés soit sur la partie gauche soit sur la partie droite d'un écran d'ordinateur, matérialisant ainsi les marqueurs spatiaux qui pouvaient être associés aux deux items mémorisés par le participant sur la base d'une information temporelle. Dans cette tâche, deux informations étaient délivrées oralement au participant de manière séquentielle, constituant une chaîne temporelle Mot 1-Mot 2. Il était ensuite demandé au participant d'imaginer une association entre ces mots et un espace spatial externe, en indiquant à quel emplacement – gauche ou droite – le premier mot ou le second mot s'associait le mieux. Dans ce type de tâche, un espace externe est donc présenté comme supplément d'information, mais seulement au moment du test fatidique. Dans le paradigme de transposition, un espace externe est présenté à la fois au moment de l'encodage (sous la forme d'un continuum vertical) et au moment du test (sous la forme d'un continuum horizontal). Par ailleurs, le paradigme de transposition n'implique la mémorisation que d'un seul item (bien que sa position doive être codée relativement aux autres éléments qui composent l'axe), réduisant d'autant plus la complexité du phénomène mesuré.

Des travaux antérieurs ont utilisé ce paradigme de transposition pour investiguer la spatialisation sous sa forme la plus élémentaire, qui sera désignée sous le nom de *biais spatial* dans l'ensemble de ce chapitre. Une première étude réalisée par McCrink et al. (2017) a tenté de mettre en évidence un biais spatial chez l'enfant âgé de deux à trois ans. Dans cette expérience, les participants devaient tout d'abord retrouver

un objet caché dans une boîte parmi cinq boîtes agencées devant eux le long d'un axe sagittal (c'est-à-dire, le long d'un axe dirigé de l'arrière du corps vers l'avant ; voir la Figure 2.1a)[3]. Après trois essais d'entraînement, permettant une habituation à l'association item/position en mémoire, la série de boîtes était subrepticement tournée à 90°, de sorte qu'elle soit disposée horizontalement devant le participant. Ce dernier devait alors retrouver l'item cible au sein de cette nouvelle disposition, et le type de biais spatial (gauche-droite, droite-gauche ou absence de biais) était enregistré par l'expérimentateur.

Les auteurs ont également fait varier la manière dont l'information sérielle était encodée en modalité sagittale. Dans une première condition, les boîtes étaient associées à un label de nature numérique (e.g., « Regarde, je cache la balle dans la Boîte *n°2* »). Dans une deuxième condition, un label de nature alphabétique était utilisé (e.g., « Regarde, je cache la balle dans la Boîte *B* »), tandis qu'une troisième condition n'impliquait aucun label spécifique (e.g., « Regarde, je cache la balle dans *cette* boîte »). Les participants étaient répartis aléatoirement dans l'une des trois conditions, et l'émergence d'un biais gauche-droite était comparée selon les groupes expérimentaux. L'objectif de cette manipulation était principalement d'éclairer la nature du biais observé, afin d'en discriminer les déterminants innés *vs.* culturels. Selon les auteurs, une absence de différence entre ces trois conditions refléterait la manifestation d'un biais spatial inné. Ce biais serait conditionné par des facteurs biologiques, dont l'expression serait universelle, du fait qu'il ne dépendrait pas du type d'ordinalité (numérique, alphabétique ou neutre) associé à l'information traitée. À l'inverse, l'apparition d'un biais spatial en présence de labels numériques et/ou alphabétiques exclusivement indiquerait la présence d'une spatialisation acquise, en particulier favorisée lorsque l'information est liée à des concepts habituellement traités spatialement dans l'environnement de l'enfant (comme une suite de chiffres ou de lettres sur des frises affichées au mur, ou plus simplement lorsque ces suites alphanumériques sont alignées dans les livres). Les résultats de cette étude ont permis de favoriser l'hypothèse culturelle, dans la mesure où un biais spatial significatif n'a pu être identifié que dans les groupes soumis aux labels numériques ou alphabétiques.

Suite à ces résultats, McCrink et al. (2017) ont proposé que le biais spatial inné, dont la direction opère naturellement de la gauche vers la droite dès la naissance (Bulf et al., 2016 ; de Hevia & Spelke, 2010 ; de Hevia et al., 2014a ; de Hevia et al., 2014b, 2017 ; Di Giorgio et al., 2019), tendrait à disparaître dans la petite enfance. Cette extinction traduirait une flexibilité cognitive de la part de l'enfant dans l'intégration des stimulations multi-directionnelles présentes dans son environnement. L'absence de traitement préférentiel (qualifié de traitement « agnostique » par McCrink et al., 2017

[3] La terminologie sagittale/verticale/horizontale sera ici préférentiellement employée pour correspondre aux usages pour caractériser l'effet SPoARC.

ou McCrink et de Hevia, 2018), tendrait ensuite à se spécifier en cumulant des expériences congruentes avec une orientation donnée. Ces expériences uni-directionnelles étant souvent véhiculées par l'entourage dans un contexte alphanumérique, un biais spatial gauche-droite serait alors favorisé lors du traitement d'une séquence labellisée (e.g., Boîte *n°1*, Boîte *n°2*, etc.), tandis qu'un traitement agnostique pourrait persister pour une information sérielle non labellisée (*cette* boîte, *cette* boîte, etc.).

Une seconde étude menée par West et McCrink (2021) a cherché à approfondir ces résultats en mesurant la présence d'un biais spatial chez des enfants âgés de un à cinq ans (en comparaison avec une population adulte). Le protocole consistait en une version numérisée de la tâche de transposition précédemment décrite, et mettait en scène une maman poussin à la recherche de sa progéniture. La position du bébé dans la séquence devait être apprise durant quatre essais d'entraînement, dispensés en modalité verticale (et non plus sagittale comme précédemment, étant donné que la tâche était présentée sur un écran placé en face du participant). Pour suivre McCrink et al. (2017), les auteurs ont fait varier le type de label associé à l'information sérielle lors de la phase d'entraînement. Les emplacements étaient ainsi désignés par un code numérique symbolique (« Boîte *n°2* »), numérique non symbolique (la boîte étant étiquetée avec des points représentant des quantités de plus en plus grandes), alphabétique (« Boîte *B* ») ou dépourvus de sens (« Boîte *Dax* »). Au moment de la phase de test, l'axe vertical était transposé à l'horizontale, et le participant était invité à retrouver le bébé au sein de cette nouvelle configuration. À l'aide de l'oculométrie, West et McCrink (2021) ont attesté de la présence d'un biais spatial en comparant le temps passé à fixer la partie gauche *vs.* la partie droite de l'écran lors de la phase de test.

Les résultats ont tout d'abord montré une absence de différence significative dans l'apparition du biais entre les différents labels[4]. De ce fait, la spatialisation a été analysée de façon groupée sur les quatre conditions expérimentales. Les résultats ont mis en évidence un biais spatial significatif à l'âge d'un an, qui n'était par ailleurs plus visible entre deux et trois ans. À quatre ans, le biais tendait à réapparaître de nouveau. Ces résultats laissent entrevoir une trajectoire développementale en U, caractérisée par la disparition d'un biais inné, suivie d'une période d'agnosticisme spatial laissant place à une réémergence d'une préférence gauche-droite conditionnée par l'expérience culturelle (voir McCrink et al., 2017 ; McCrink & de Hevia, 2018). Cependant, alors que l'hypothèse d'enculturation prédit une consolidation du biais spatial après sa réapparition au cours du développement, les analyses de West et McCrink (2021) n'ont pas permis d'observer d'effet significatif après quatre ans, que ce soit à l'âge de cinq ans, ou même chez l'adulte, alors que l'effet aurait dû être maximal pour les participants

[4] Les auteurs ont pu justifier ce résultat nul en expliquant qu'aucune mesure n'avait été effectuée pour vérifier que les labels avaient été distinctement identifiés par les participants, si bien que ces derniers auraient pu uniquement se focaliser sur la scène visuelle.

les plus âgés.

En définitive, ces deux études n'ont pas permis d'établir de façon certaine la trajectoire développementale concernant les associations spatio-positionnelles élémentaires en mémoire. À l'âge de deux et trois ans, la culture semble favoriser la spatialisation de l'information sérielle lorsque cette dernière est accompagnée d'un marqueur ordinal explicite (numérique ou alphabétique). À l'inverse, une information ordinale codée de manière plus abstraite (i.e., la condition non labellisée de McCrink et al., 2017) semble nécessiter une imprégnation culturelle plus importante pour opérer spontanément dans le sens préférentiel propre à la culture de référence pour la population. Par ailleurs, c'est le traitement de cette information sérielle non labellisée explicitement qui nous intéresse tout particulièrement dans ce chapitre, dans la mesure où elle semble refléter au mieux la spatialisation mobilisée dans le cas du SPoARC (à savoir une spatialisation plus spontanée, non façonnée par des structures spatiales ancrées en mémoire à long terme). Une hypothèse pouvant être avancée est que l'ancrage culturel nécessaire à l'émergence d'un biais spatial opérant de façon plus implicite pourrait être à son paroxysme lors de l'apprentissage formel de la lecture et de l'écriture, dont la pratique, par un effet d'expertise, pourrait entraîner la formation d'associations entre l'information ordinale et le sens gauche-droite. Dans le système scolaire français, l'apprentissage explicite de cette activité est principalement délivré en première année d'école élémentaire (i.e., entre six et sept ans), bien que l'enfant puisse être sensibilisé au langage écrit au cours de l'école maternelle. Ainsi, nous proposons l'idée que le biais spatial (qui fera l'objet d'expérimentations dans le présent chapitre) se développe à la condition que le système de lecture-écriture fasse l'objet d'un apprentissage intensif.

Un contre-argument pouvant être avancé au regard de cette hypothèse du rôle prévalent d'une maîtrise de la lecture-écriture est la trajectoire développementale mise en évidence par West et McCrink (2021), qui montre la réémergence d'une préférence gauche-droite à quatre ans après l'extinction du biais inné. Cependant, l'interprétation de leur résultat reste délicate : en raison d'une absence de différence significative entre les différents labels, les auteurs ont mesuré le biais spatial en groupant des participants soumis à des labels à forte valence ordinale (les deux types de labels numériques et les labels alphabétiques, correspondant à 75% de l'échantillon global, $N = 48$) et ceux exposés à des labels dénués de sens ($N = 16$). Ainsi, il est possible que l'effet mesuré au niveau du groupe ait été principalement porté par ces 75%. D'autre part, l'absence d'effet observée chez l'adulte interroge quant à la sensibilité de leur protocole à détecter l'effet putatif. Pour ces raisons, ce chapitre expérimental tentera de mieux décrire le développement du biais spatial chez l'enfant lorsque l'information sérielle est traitée en l'absence de tout contexte alphanumérique[5].

[5] Il convient de noter que Rugani et al. (2022) ont également tenté de mettre en évidence un biais spatial dans le traitement de l'ordre sériel en l'absence de tout label ordinal auprès d'enfants âgés entre

2.2 Expérience 1

2.2.1 Objectif

Les données de cette première expérience ont été recueillies en amont du présent travail doctoral, dans le cadre d'une étude préexistante conduite dans notre laboratoire (Vivion, 2021). Le protocole présenté ici s'inspire des travaux de McCrink et al. (2017) et West et McCrink (2021) et a tenté de mesurer un biais spatial chez l'enfant, en comparaison avec une population adulte. La tâche proposée consistait à retrouver un item dissimulé de manière répétée dans une boîte spécifique, elle-même située au sein d'une série de six boîtes disposées sur un plan sagittal. Après plusieurs essais d'entraînement, l'axe sagittal était subrepticement transposé à l'horizontale, et les participants devaient retrouver l'emplacement cible au sein de cette nouvelle configuration spatiale. Afin d'examiner l'évolution du biais spatial à différents stades du développement, des groupes d'enfants allant de la pré-maternelle à la dernière année d'école élémentaire ont été testés. Pour rappel, l'un des choix méthodologiques de cette étude concernait l'absence de labellisation des boîtes présentées pendant la tâche, contrairement à ce qui a pu être proposé dans des travaux antérieurs (voir McCrink et al., 2017 ; West & McCrink, 2021). Un tel choix visait à favoriser la mesure d'un biais spatial le plus spontané possible en limitant l'influence d'indices culturels explicites. En accord avec l'hypothèse d'enculturation, il était attendu qu'un biais spatial émerge à partir du Cours Préparatoire (CP), une période où les enfants entament un apprentissage formel et intensif de la lecture et de l'écriture. Nous nous attendions également à ce que l'effet se renforce progressivement avec l'avancée dans la scolarité. Pour cette dernière

trois et six ans. Cependant, la manière de renseigner la présence d'un biais gauche-droite différait de l'approche classiquement employée dans une tâche de transposition : dans l'étude de Rugani et al. (2022), une série de boîtes non labellisées était disposée de manière horizontale devant le participant dès la phase d'encodage. L'enfant observait l'expérimentateur, qui cachait un item dans une boîte spécifique au sein de l'axe horizontal. Après un court intervalle de distraction, le participant devait ensuite se souvenir de la position cible en récupérant l'item dans la boîte correspondante. Les auteurs ont considéré que les participants manifestaient un biais gauche-droite lorsque l'exactitude du rappel était supérieure pour les items dissimulés du côté gauche de l'axe horizontal. Si un tel effet a pu être mis en évidence chez les enfants de quatre et cinq ans, des résultats plus disparates ont été observés dans les deux autres groupes d'âges : chez les enfants de trois ans, ce biais mnésique en faveur de l'espace gauche n'était détectable que lorsque l'expérimentateur était lui-même placé à gauche du participant, sa position constituant un point de repère pour l'enfant. Par ailleurs, cette procédure n'a pas permis de montrer un biais préférentiel chez les enfants de six ans, qui tendaient à rappeler correctement la position de l'item qu'il soit dissimulé du côté gauche ou du côté droit de l'axe. Parce qu'une préférence du côté gauche a difficilement pu être identifiée chez ces enfants plus âgés par le biais de cette procédure, et pour faciliter la mise en perspective de nos résultats avec ceux de précédentes études, les expériences de cette thèse ont favorisé l'examen d'un biais spatial élémentaire par le biais du paradigme de transposition, permettant de mesurer l'orientation *spontanée* d'une recherche sérielle appliquée à un axe horizontal (ce paradigme demeurant une approche plus largement adoptée dans la littérature chez l'enfant ou l'animal, Drucker et Brannon, 2014 ; McCrink et al., 2017 ; Rugani et al., 2010 ; West et McCrink, 2021).

raison, nous anticipions que les adultes présenteraient le biais spatial gauche-droite le plus marqué en raison d'une exposition prolongée à des normes culturelles structurant les informations sérielles dans cette même direction. Ce groupe a dès lors été retenu comme population de référence pour cette première étude pour maximiser les chances de trouver un effet significatif.

2.2.2 Méthode

2.2.2.1 Participants

Cette première expérience a été approuvée par le comité d'éthique de l'Université Côte d'Azur (CERNI-Dossier n°2018-3)[6]. Un échantillon composé de 188 enfants et 28 adultes a pris part à cette étude. Les participants enfants ont été répartis selon leur niveau d'instruction au moment de la passation : Pré-Maternelle (noté PM et correspondant aux enfants rencontrés en crèche), Petite, Moyenne et Grande Section de maternelle (PS, MS et GS), Cours Préparatoire (CP), Cours Élémentaire 1 et 2 (CE1 et CE2) ainsi que Cours Moyen 1 et 2 (CM1 et CM2). Les données des enfants de MS et GS ont été analysées comme un seul groupe en raison d'un faible effectif en GS (N = 8). Ce regroupement est justifié sur le plan des apprentissages, notamment concernant le langage écrit, ces deux classes étant les dernières du cycle des apprentissages premiers (Cycle 1, Ministère de l'Éducation nationale, 2024). Les programmes scolaires soulignent en effet que les attendus en matière de connaissances alphabétiques et de sensibilisation à l'écriture sont davantage rapprochés entre la moyenne section et la grande section qu'entre la grande section et le cours préparatoire (ce dernier correspondant à la première année du Cycle 2, aussi appelé cycle des apprentissages fondamentaux, Ministère de l'Éducation nationale, 2020). De manière similaire, les données des enfants CM1 et CM2 ont été combinées en un seul groupe, le nombre de participants en CM2 ayant pu participer à cette étude étant très restreint (N = 2). Ce regroupement s'appuie également sur une cohérence pédagogique, ces deux niveaux constituant le Cycle 3, nommé cycle de consolidation des apprentissages scolaires dans les textes de l'Éducation Nationale. Durant ce cycle, les enfants ont achevé leur apprentissage de la lecture et de l'écriture propre au Cycle 2 (Ministère de l'Éducation nationale, 2020) et exploitent désormais ces compétences de manière plus diversifiée, favorisant le développement d'une plus large expertise sur le plan du langage écrit (Ministère de l'Éducation nationale, 2023). Pour chaque groupe d'âge, l'effectif total et l'âge moyen sont indiqués dans le Tableau 2.1. Les enfants ayant participé à cette étude ont tous été recrutés puis rencontrés dans trois établissements scolaires publics de la ville de

[6] Les Expériences 2 et 3 ont également été approuvées par ce même comité, sous le même numéro de dossier.

Nice.

Sur le plan de la puissance statistique, la taille moyenne des échantillons de cette première expérience est basée sur l'étude de McCrink et al. (2017). Pour rappel, cette étude proposait trois conditions expérimentales (ordre sériel Numérique, Alphabétique ou Non Labellisé). Les auteurs ont échantillonné un total de 48 enfants par condition, avec une répartition homogène entre les enfants de deux et trois ans. Une taille d'échantillon similaire (environ 24 participants par groupe d'âge) était visée dans cette première expérience, en laissant la possibilité d'analyser les données en combinant des groupes d'âges pour atteindre plus de puissance statistique dans un premier temps (par exemple, atteindre un effectif de 53 participants en regroupant les PM et les PS, et ainsi de suite ; voir le Tableau 2.1). Cette répartition permettait par ailleurs d'analyser dans un second temps la présence d'un biais spatial de manière plus fine pour chaque groupe d'âge, tout en proposant une analyse de puissance a posteriori pour évaluer la robustesse des résultats. Une analyse de puissance a posteriori a également été conduite pour le groupe d'adultes, bien que l'effectif de 28 participants reste cohérent avec la taille des échantillons fréquemment mobilisés dans la littérature sur la spatialisation en mémoire de travail (e.g., Guida et al., 2018a, 2018b, 2020c ; Guida & Porret, 2022 ; Sahan et al., 2022 ; Zhou et al., 2021).

Tableau 2.1 – Effectif et âge moyen pour chaque groupe de l'Expérience 1

Groupe	*N*	Âge	(ET)
PM	26	2.5	(0.58)
PS	27	3.6	(0.49)
MS & GS	38	4.9	(0.72)
CP	29	7.1	(0.34)
CE1	15	8.2	(0.44)
CE2	27	9.1	(0.38)
CM1 & CM2	26	10.2	(0.31)
Adultes	28	32.2	(14.54)

2.2.2.2 Matériel

Les stimuli utilisés dans cette étude consistaient en six cartes de 3.5 cm×3.5 cm représentant les dessins colorés de six animaux : *Abeille*, *Cochon*, *Fourmi*, *Grenouille*, *Mouton* et *Tortue*. Une carte supplémentaire de même dimension mais représentant un cadeau a été utilisée pour la phase de test (voir la Figure B.1 en Annexe B). Pour chaque nom d'animal, la fréquence, le nombre de syllabes et l'âge d'acquisition ont été contrôlés grâce à la plateforme OpenLexicon, comme indiqué dans le Tableau B.1 de l'Annexe B. Pour constituer l'axe, un plateau en carton de 70 cm×12 cm a été utilisé.

Six gobelets opaques de 8 cm de diamètre et d'aspects strictement identiques étaient collés sur ce plateau. La distance entre chaque gobelet était de 4.5 cm et chacun d'eux était fermé par un couvercle amovible en papier.

2.2.2.3 Procédure

Les passations se sont déroulées au sein des établissements scolaires pour les participants enfants, et à domicile pour les participants adultes. Quel que soit leur âge, les participants ont été rencontrés de manière individuelle, dans un environnement calme et à l'abri de toute distraction. Le participant était assis en face de l'expérimentateur, l'axe étant placé sur une table entre les deux protagonistes, à environ 30 cm. La tâche débutait avec une explication du déroulement de l'expérience et l'apport de quelques consignes préliminaires. Pour donner un contexte ludique à la tâche, l'expérimentateur expliquait aux enfants que le jeu consistait à jouer à cache-cache avec différents animaux représentés sur des cartes. Il précisait qu'il avait besoin de l'aide de l'enfant pour retrouver ces animaux. L'expérimentateur expliquait que chaque boîte placée devant l'enfant servait de cachette et que les animaux ne pouvaient se dissimuler que dans ces boîtes-ci. Avant le début de l'expérience, l'enfant était invité à nommer les animaux figurant sur les cartes afin de vérifier que tous les stimuli lui étaient suffisamment familiers. La procédure était similaire pour le groupe d'adultes, mais il leur était par ailleurs précisé que l'expérience avait été initialement conçue pour de jeunes enfants. Ils étaient donc informés que la tâche pouvait leur sembler très facile, mais qu'ils devaient simplement répondre aussi intuitivement que possible aux questions posées par l'expérimentateur. Cette précision a été apportée afin de limiter les risques que les adultes ne fondent leurs réponses sur une lecture trop analytique de la tâche (en imaginant par exemple devoir répondre à une question relevant d'un piège dans leur esprit).

Phase d'entraînement (essais sagittaux). La phase d'entraînement proposée aux participants était constituée de la manière suivante : la série de six boîtes était disposée de manière sagittale devant le participant (voir la Figure 2.1a). En face du participant, l'expérimentateur lui montrait une première carte et lui demandait de nommer l'animal figurant dessus (« *Quel animal va aller se cacher ?* »). Ensuite, l'expérimentateur plaçait la carte dans la deuxième boîte en partant du participant[7]. Ce dernier avait les yeux ouverts et pouvait donc voir où la carte était cachée. Le participant était ensuite invité à pointer du doigt la boîte cible afin de récupérer la carte. Une fois l'animal retrouvé, la même procédure était appliquée pour quatre autres animaux (présentés dans

[7] Le choix de dissimuler les items dans la deuxième boîte de la série découle de l'étude réalisée par Rugani et al. (2010). Dans leur étude, la nourriture qui devait être retrouvée par les animaux était placée (en moyenne) en cinquième position sur les 16 emplacements possibles, ce qui représente un emplacement proportionnellement équivalent à la deuxième position sur six.

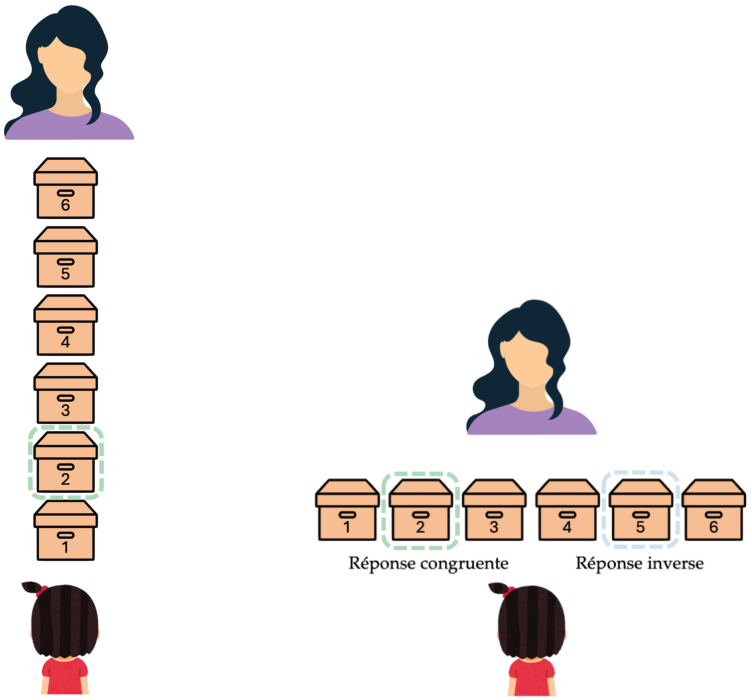
un ordre aléatoire pour chaque participant). Pour l'ensemble de ces essais, la carte était toujours cachée dans la deuxième boîte pour encourager le participant à associer tous les items à une position unique au sein de l'axe sagittal. Pour le dernier animal (sixième essai), en accord avec la procédure de McCrink et al. (2017), l'expérimentateur demandait au participant de fermer les yeux pendant qu'il cachait la dernière carte (« *Cette fois, l'animal va se cacher sans que tu puisses le regarder, mais à mon avis, tu sais déjà où il va aller...* »). Une fois ses yeux ré-ouverts, le participant devait pointer du doigt la boîte où il pensait pouvoir retrouver l'animal caché. Il pouvait ensuite regarder dans la boîte qu'il avait sélectionnée pour vérifier sa réponse, et la bonne boîte (toujours la deuxième) lui était pointée en cas d'erreur.

Les cinq premiers essais de la phase d'entraînement duraient environ 15 secondes chacun (3 secondes pour la présentation de chaque stimulus, 2 secondes pour cacher la carte dans la deuxième boîte, 5 secondes pour la phase de recherche et 5 secondes pour la phase de vérification). Le dernier essai en sagittal (Essai 6) durait quant à lui 17 secondes (la phase de dissimulation ayant duré en moyenne 4 secondes au lieu de 2).

Phase de test (essai horizontal). Lors du dernier essai (Essai 7, voir la Figure 2.1b), il était dit au participant que tous les animaux avaient été trouvés avec succès, mais qu'il restait une dernière carte spéciale à retrouver. Comme pour l'essai précédent, il était demandé au participant de fermer les yeux pendant que l'expérimentateur cachait cette dernière carte. Cependant, afin de s'assurer que le participant associait bien l'essai test à ceux proposés lors de la phase d'entraînement, il était rappelé que tous les animaux avaient toujours été trouvés dans la même boîte (voir McCrink et al., 2017). L'expérimentateur s'assurait alors que les yeux du participant étaient bien fermés avant de dissimuler la carte dans la deuxième boîte. Une fois la carte cachée, l'expérimentateur effectuait une rotation de l'axe à 90° de sorte que la série de boîtes soit orientée horizontalement en face du participant. Une attention particulière était portée à éviter tout bruit pendant cette rotation et à placer la série de boîtes de manière parfaitement symétrique par rapport au participant. Ces précautions visaient à contrôler l'influence potentielle d'indices auditifs ou spatiaux lors de l'estimation de la position finale par le participant. Lorsque le participant rouvrait les yeux, il lui était demandé de pointer la boîte dans laquelle il pensait que la carte avait été cachée. Il pouvait ensuite regarder à l'intérieur de la boîte sélectionnée pour vérifier si sa supposition était correcte. En cas d'erreur, les participants étaient invités à indiquer un nouvel emplacement.

La durée de cet essai horizontal était de 20 secondes (comprenant 4 secondes d'explication avant la dissimulation de la carte, 5 secondes pour la phase de dissimulation

et de rotation, 6 secondes pour la phase de recherche et 5 secondes pour la phase de vérification). Il est à noter que cette durée totale pouvait légèrement varier en fonction des participants, certains trouvant la carte du premier coup, et d'autres ayant besoin de plus de tentatives pour retrouver l'item et terminer la tâche. Seule la première réponse donnée au cours de l'essai final a été analysée pour déterminer si les participants présentaient un biais spatial orienté de gauche à droite (lorsqu'ils cherchaient dans la deuxième boîte en commençant par la gauche de l'axe horizontal), de droite à gauche (lorsqu'ils cherchaient dans la deuxième boîte en commençant par la droite) ou lorsque leur choix se portait sur n'importe quelle autre boîte.



(A) Phase d'entraînement (Essais 1 à 6) (B) Phase de test (Essai 7)

FIGURE 2.1 – Configurations spatiales des essais d'entraînement et de test pour l'Expérience 1. *Note.* La numérotation visible sur la figure a été ajoutée à des fins de clarté ; les boîtes n'ayant pas été associées à des labels numériques lors de la tâche expérimentale.

2.2.3 Résultats

Le package *stats* du logiciel R (R Core Team, 2023) a été utilisé pour analyser les données de cette expérience. Les réponses des participants ont été codées comme « Congruentes » lorsqu'elles correspondaient au biais spatial gauche-droite attendu (i.e., la Boîte n°2). Les réponses qui correspondaient à un biais spatial inversé (la Boîte n°5, correspondant à une spatialisation orientée de droite à gauche) ont été codées comme « Inverses ». Toutes les autres réponses ont été codées comme « Incongruentes ». Pour évaluer la présence d'un biais spatial, nous avons d'abord effectué une série de χ^2

d'ajustement. Ces tests nous ont permis d'évaluer si la distribution des réponses entre les six boîtes différait d'une distribution aléatoire dans nos différents échantillons. Ensuite, nous avons effectué une série de tests binomiaux pour évaluer si une boîte donnée (par exemple, la Boîte n°2) avait été choisie significativement plus que le hasard. Sous l'hypothèse d'un biais orienté de gauche à droite, nous nous attendions à ce que la Boîte n°2 soit préférentiellement choisie par les participants.

2.2.3.1 Analyse groupée

Une première analyse a été réalisée en groupant les échantillons de participants dans le but d'approcher un effectif similaire à celui de l'étude de McCrink et al. (2017), dans laquelle les auteurs avaient détecté un effet avec 48 participants en combinant deux groupes d'âge. Dans la présente étude, les groupes ont été constitués de manière à conserver autant que possible une certaine homogénéité entre les différents niveaux de langage écrit tout en gardant un équilibre suffisamment cohérent entre les différentes tailles d'échantillon. En conséquence, les enfants de pré-maternelle ont été regroupés avec ceux de petite section de maternelle ($N = 53$, âge moyen = 3.1 ans, $ET = 0.77$), les enfants de moyenne et grande section de maternelle avec ceux de CP ($N = 67$, âge moyen = 5.9 ans, $ET = 1.23$), et enfin les enfants scolarisés du CE1 au CM2 ($N = 68$, âge moyen = 9.3 ans, $ET = 0.86$).

Des premiers χ^2 d'ajustement ont indiqué que les distributions de réponses au sein des différents groupes (voir le Tableau 2.2 et la Figure 2.2) différaient toutes significativement d'une distribution liée au hasard (tous les $\chi^2 \geq 16.85$, toutes les valeurs $p \leq .005$ et tous les W de Cohen ≥ 0.56). Un test binomial bilatéral (basé sur une probabilité théorique de choisir une boîte spécifique de $\pi = \frac{1}{6}$) a été ensuite réalisé en prenant en compte l'ensemble des participants. Les résultats ont indiqué que la deuxième boîte en partant de la gauche de l'axe avait été choisie significativement plus que le hasard (87 réponses congruentes sur les 216 réponses, $p < .001$, h de Cohen = 0.38). La même analyse a été effectuée au sein de chaque groupe d'âge, en utilisant un seuil critique de $p = \frac{.05}{4} = .0125$ après une correction de Bonferroni. Les résultats se sont avérés être significatifs pour le groupe des MS, PS et CP (30 réponses congruentes sur 67 réponses, $p < .001$, h de Cohen = 0.44) ; pour le groupe des CE1 au CM2 (23 réponses congruentes sur 68 réponses, $p < .001$, h de Cohen = 0.28) ; et chez les adultes (21 réponses congruentes sur 28 réponses, $p < .001$, h de Cohen = 0.89). Ce même test n'a cependant pas atteint le seuil de significativité pour les enfants de PM et PS (13 réponses congruentes sur 53 réponses, $p = .138$).

Ces résultats semblent suggérer qu'un biais spatial était présent chez nos participants de la moyenne section (quatre ans) jusqu'au CM2 (10 ans) ainsi que chez les participants adultes. Cependant, une analyse plus approfondie a permis de révéler

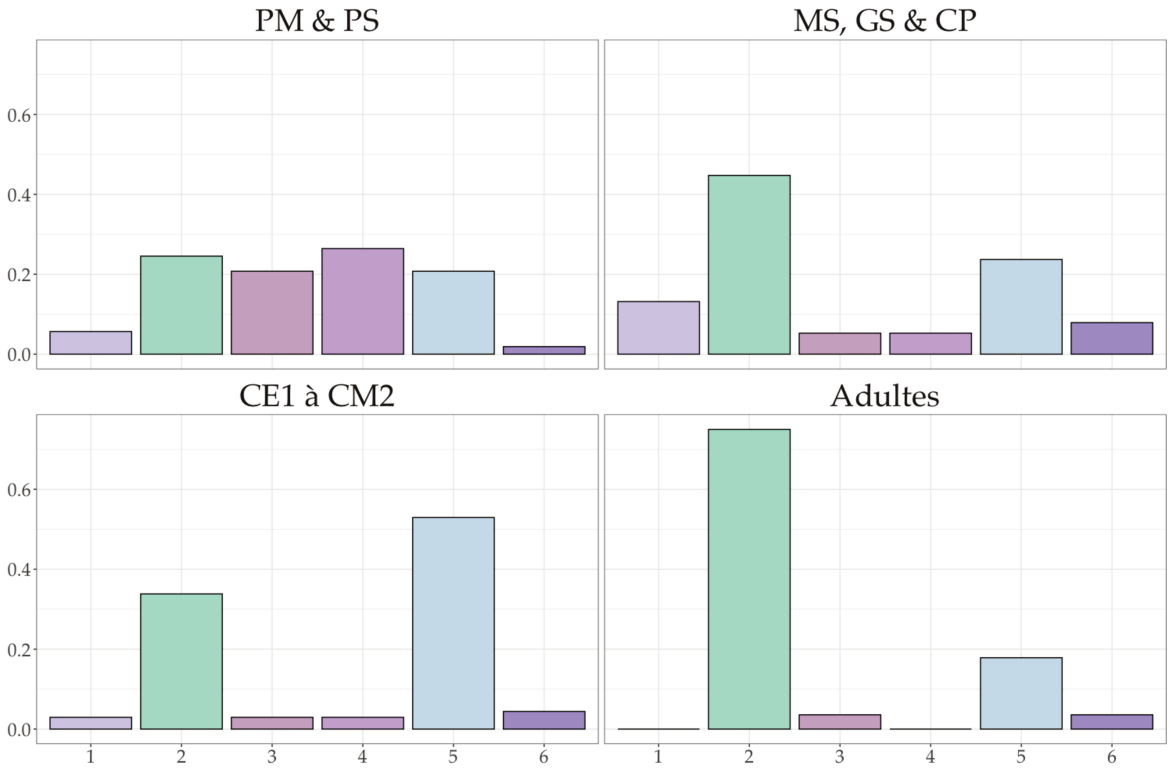


FIGURE 2.2 – Distribution des réponses entre les six boîtes pour l'analyse groupée de l'Expérience 1

qu'une autre boîte avait été choisie plus que le hasard pour le groupe d'enfants scolarisés du CE1 au CM2. Ces enfants ont en effet également sélectionné la Boîte n°5, correspondant à un choix inverse (36 réponses inverses sur 68 réponses, $p < .001$, h de Cohen = 0.56), les proportions observées suggérant même une préférence pour ce choix inverse en comparaison du choix congruent. Des tests binomiaux supplémentaires ont donc été effectués pour chaque groupe afin de comparer les choix pour la Boîte n°2 et la Boîte n°5 et déterminer si l'une d'elles avait été sélectionnée significativement plus souvent que l'autre. Pour ce test, la proportion de réponses observées entre ces deux boîtes a été comparée à une proportion théorique de $\pi = \frac{1}{2}$, attendue sous l'hypothèse d'une répartition aléatoire entre les deux choix. Les résultats de ces tests (présentés dans le Tableau 2.2) ont indiqué que la Boîte n°2 avait été choisie significativement plus souvent que la Boîte n°5 uniquement pour les adultes (21 réponses congruentes sur 26 réponses, $p = .001$, h de Cohen = 0.47). Il convient de noter que le résultat pour le groupe MS, GS et CP était statistiquement significatif sur la base d'un seuil de $p < .05$, mais pas après une correction de Bonferroni (en utilisant un seuil de p fixé à $\frac{.05}{4} = .0125$).

Une troisième analyse a été effectuée en regroupant les réponses congruentes et inverses (Boîtes n°2 et 5) dans le but de les comparer aux réponses incongruentes

(Boîtes n°1, 3, 4 et 6). L'objectif de cette analyse était d'évaluer, pour chaque groupe d'âge, la capacité des participants à produire une réponse correcte, indépendamment de la direction adoptée pour traiter l'axe horizontal (de gauche à droite pour la Boîte n°2 et de droite à gauche pour la Boîte n°5). Ces choix, regroupés sous le terme de « réponses correctes non-directionnelles, » ont été considérés comme un indicateur de la compréhension globale de la tâche une fois la rotation de l'axe effectuée. Un test binomial basé sur une probabilité théorique $\pi = \frac{2}{6}$ a révélé que ces choix corrects non-directionnels ont été réalisés significativement plus que le hasard pour le groupe MS, GS et CP ($p < .001$, h de Cohen $= 0.53$) ; le groupe CE1 à CM2 ($p < .001$, h de Cohen $= 0.83$), mais pas pour les enfants de PM et PS ($p = .079$). L'absence de résultat significatif pour ce dernier groupe suggère que les enfants les plus jeunes ont rencontré des difficultés pour estimer les boîtes les plus plausibles (indépendamment de la direction) une fois l'axe placé à l'horizontale.

Tableau 2.2 – Distribution des réponses entre les six boîtes pour chaque groupe d'âge de l'Expérience 1

Groupe	N	B n°1	B n°2 (%)	B n°3	B n°4	B n°5	B n°6	B n°2 + B n°5 (%)	p-valeur B n°2 *vs.* B n°5	Puissance [1]
					Analyse groupée					
PM & PS	53	3	13 (25%)	11	14	11	1	24 (45%)	$p = .419$	/
MS, GS & CP	67	9	**30 (45%)***	3	4	17	4	**47 (70%)***	$p = .039$	/
CE1 à CM2	68	2	**23 (34%)***	2	2	**36***	3	**59 (87%)***	$p = .058$	/
					Analyse dégroupée					
PM	26	0	7 (27%)	6	10	2	1	9 (35%)	$p = .089$	.71
PS	27	3	6 (22%)	5	4	9	0	15 (55%)	$p = .304$	.57
MS & GS	38	5	**17 (45%)***	2	2	9	3	**26 (68%)***	$p = .084$	.99
CP	29	4	**13 (45%)***	1	2	8	1	**21 (72%)***	$p = .192$	.98
CE1	15	0	6 (40%)	1	0	7	1	**13 (87%)***	$p = .71$	.99
CE2	27	1	10 (37%)	1	2	**13***	0	**23 (85%)***	$p = .798$	.99
CM1 & CM2	26	1	7 (27%)	0	0	**16***	2	**23 (88%)***	$p = .047$	.99
Adultes	28	0	**21 (75%)***	1	0	5	1	**26 (93%)***	$p = .001$*	.99

Note. Les réponses associées à la Boîte n°2 ont été considérées comme des réponses congruentes et celles associées à la Boîte n°5 comme des réponses inverses. La colonne « Boîte n°2 + Boîte n°5 » recense l'ensemble des réponses correctes non-directionnelles (i.e., correspondant à une bonne réponse, peu importe le point de départ adopté pour traiter l'ordre de la série en condition horizontale). Pour chaque boîte prise isolément, un test binomial bilatéral basé sur une probabilité fixée à $\pi = \frac{1}{6}$ a été réalisé pour déterminer si les proportions de réponses différaient de celles attendues sous l'hypothèse du hasard. Une probabilité $\pi = \frac{2}{6}$ a été utilisée pour estimer si les choix associés à la Boîte n°2 ou à la Boîte n°5 (réponses correctes non-directionnelles) ont été opérés significativement plus que le hasard. Les valeurs en **gras*** sont celles ayant atteint le seuil de significativité pour l'un ou l'autre de ces tests. Une probabilité $\pi = \frac{1}{2}$ a enfin été utilisée pour déterminer si la Boîte n°2 avait été choisie plus fréquemment que la Boîte n°5 (ou inversement, en fonction du pattern de réponse observé). Le seuil de la p-valeur a été fixé à $\frac{0.05}{4} = .0125$ pour l'analyse groupée, contre $\frac{0.05}{8} = .006$ pour l'analyse non groupée après correction de Bonferroni.

[1] Une analyse de puissance post hoc réalisée à l'aide du logiciel G*Power 3.1 (Faul et al., 2009) a révélé que la taille des échantillons dans l'analyse non groupée permettait d'atteindre une puissance suffisante (Puissance > .80) pour les tests binomiaux de chaque groupe d'âge, à l'exception des enfants en crèche et en début de maternelle. Pour chaque groupe d'âge, la dernière colonne indique la puissance obtenue pour le test binomial basé sur la plus grande différence de fréquences. Par exemple, la puissance a atteint .99 dans le groupe d'enfants scolarisés en fin de maternelle pour le test opposant la Boîte n°2 + la Boîte n°5 aux autres boîtes (i.e., 26 réponses correctes non-directionnelles contre 12 réponses incongruentes). Une puissance supérieure à .80 pour un groupe d'âge donné indique donc qu'une différence suffisamment importante entre les fréquences a été observée au moins une fois. Cette observation suggère que, pour un même échantillon, une puissance plus faible mesurée dans d'autres tests peut être due à une différence moins marquée entre les fréquences, plutôt qu'à une trop faible taille d'échantillon. Ce raisonnement peut également s'appliquer entre les groupes. Par exemple, étant donné que la taille de l'échantillon du groupe en début de maternelle correspond à celle d'un autre groupe (CE2) pour lequel nous avons détecté une puissance suffisante (.99) pour un test donné, nous pouvons conclure qu'il y avait suffisamment de participants dans le groupe « Début de maternelle » pour détecter un potentiel effet. Le même raisonnement s'applique pour les enfants en crèche.

2.2.3.2 Analyse dégroupée

Afin d'obtenir une estimation plus fine du biais spatial en fonction de l'âge des participants, une analyse dégroupée a été réalisée. Les différents tests présentés ci-haut ont été conduits sur les huit groupes d'âges présentés dans le Tableau 2.1. Des premiers χ^2 d'ajustement ont indiqué que la distribution des réponses entre les six boîtes (voir le Tableau 2.2, voir également la Figure 2.3) différait d'une distribution uniforme dans tous les groupes d'âge à l'exception des enfants en milieu et fin de maternelle ($\chi^2(5) = 10.11$, $p = .072$ pour le groupe MS et GS ; pour tous les autres groupes, $\chi^2 \geq 17.85$, $p \leq .003$ et W de Cohen ≥ 0.83).

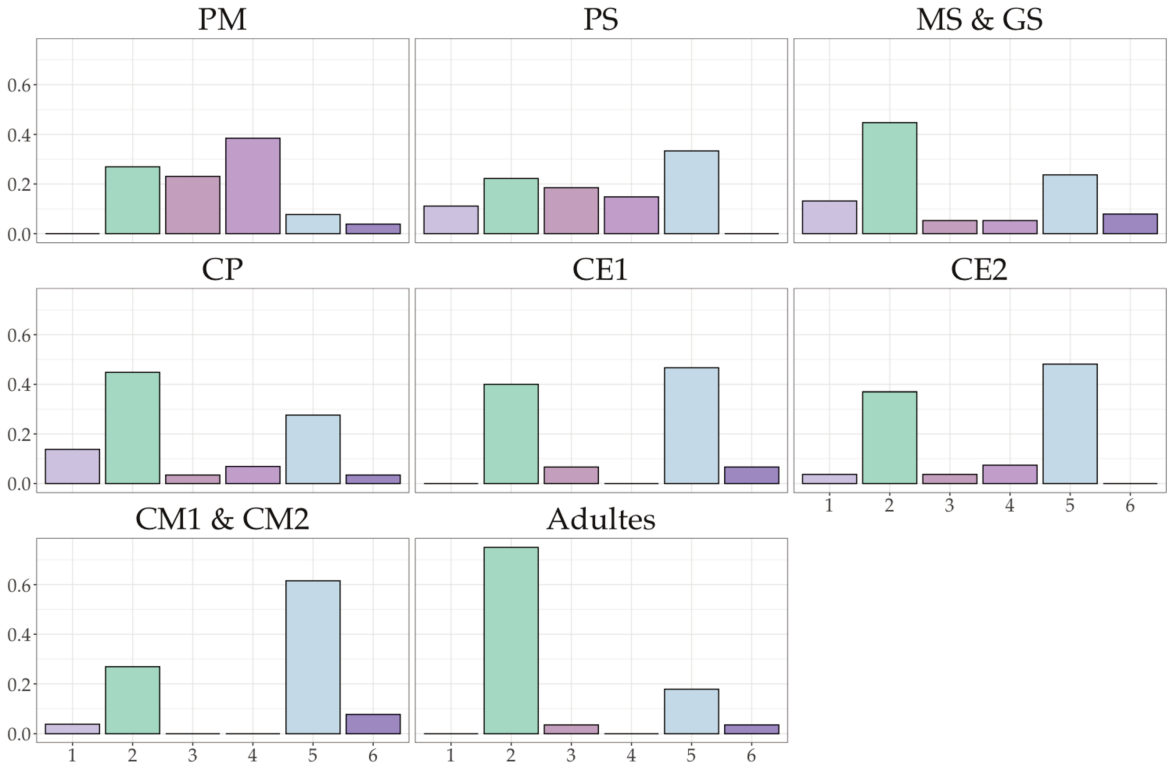


Figure 2.3 – Distribution des réponses entre les six boîtes pour chaque groupe d'âge de l'Expérience 1

Afin d'évaluer le niveau de compréhension global de la tâche pour chaque groupe séparément, des tests binomiaux ont ensuite été conduits pour déterminer si les Boîtes n°2 et 5 avaient été préférentiellement sélectionnées par les participants. Les résultats se sont révélés significatifs pour tous les groupes d'âges, à l'exception des enfants de prématernelle et des enfants de petite section (voir le Tableau 2.2). Il est à noter que, bien que le résultat du test binomial pour le groupe de petite section était significatif au seuil conventionnel de $p < .05$, il n'a pas atteint une significativité après l'ajustement du seuil critique par une correction de Bonferroni ($p \frac{.05}{8} = .006$). Une analyse corrélationnelle a ensuite été réalisée entre les réponses correctes non-directionnelles (cotées 1, contre 0

pour les réponses incongruentes) et l'âge des participants. Cette corrélation s'est avérée être positive et significative, à la fois en incluant les participants adultes dans l'analyse (ρ de Spearman $= 0.38, p < .001$), mais également en excluant les adultes(ρ de Spearman $= 0.35, p < .001$, voir la Figure B.2 dans l'Annexe B). Avec l'âge, les participants tendaient donc à produire davantage de réponses correctes, indépendamment du sens adopté pour traiter la série à l'horizontale.

Par la suite, des tests binomiaux ont été conduits pour déterminer si la Boîte n°2 avait été choisie au-delà du hasard dans chaque groupe d'âge. Le test a atteint la significativité (au seuil corrigé de $p = .006$) pour les enfants de moyenne et grande section, de CP ainsi que pour les adultes (tous les $p < .001$, tous les h de Cohen ≥ 0.44). Les résultats étaient également significatifs pour les enfants de CE1 et CE2 en considérant le seuil plus libéral de $p = .05$ ($p = .027$, h de Cohen $= 0.37$ pour les enfants de CE1, et $p = .009$, h de Cohen $= 0.33$ pour les enfants de CE2). Ce même test n'était cependant pas significatif pour les pré-maternelles, les enfants de petite section et les enfants de CM1 et CM2 (tous les $p \geq .183$).

Des tests binomiaux complémentaires ont enfin été réalisés au sein de chaque groupe afin d'évaluer la présence d'un biais spatial. Ces tests ont évalué si les réponses en faveur de la Boîte n°2 étaient plus importantes que celles pour la Boîte n°5 (ou inversement lorsque la Boîte n°5 était choisie plus souvent que la Boîte n°2), avec une probabilité théorique fixée à $\pi = \frac{1}{2}$. Les résultats ont montré que seuls les adultes ont choisi la Boîte n°2 significativement plus souvent que la Boîte n°5 (21 réponses congruentes sur 26 réponses, $p = .001$, h de Cohen $= 0.47$, voir le Tableau 2.2 pour les résultats de ce test pour chaque groupe d'âge). Inversement, les enfants de CM1 et CM2 ont eu tendance à sélectionner davantage la Boîte n°5 par rapport à la Boîte n°2, ce résultat n'étant par ailleurs pas significatif au seuil corrigé de $p = \frac{0.05}{8} = .006$.

2.2.4 Discussion

Cette première expérience visait à évaluer la présence d'un biais spatial lors du traitement d'une série ordinale présentée sur un plan horizontal. Après avoir encodé de manière répétée la localisation d'un item au sein d'une série de boîtes orientée sur un plan sagittal, les participants devaient retrouver cette localisation cible une fois l'axe renversé à 90°. Sous l'hypothèse d'un biais orienté de gauche à droite, il était attendu que les participants sélectionnent préférentiellement la deuxième position en partant de la gauche de l'axe. Dans le but d'étudier l'évolution de ce phénomène au fil de l'âge, les réponses de différents groupes d'enfants, allant de la pré-maternelle au CM2, ont été analysées et comparées à celles d'une population adulte. En postulant que le biais spatial résulte d'un façonnage culturel lié à l'apprentissage du langage écrit, il était

attendu qu'un biais soit observable dès le cours préparatoire, puis qu'il se consolide au fil de la scolarisation.

En accord avec nos hypothèses, aucun biais spatial n'a pu être mis en évidence chez les enfants les plus jeunes (correspondant aux groupes de pré-maternelle et de petite section). Nos analyses n'ont en effet pas révélé de préférence en faveur ni de la Boîte n°2 (caractéristique d'un biais gauche-droite), ni de la Boîte n°5 (caractéristique d'un biais droite-gauche). Au-delà d'une absence de biais spatial, la non-prééminence de ces deux réponses dans nos résultats suggère surtout une représentation encore imprécise des positions plausibles de l'item une fois l'axe transposé à l'horizontale. Les enfants de ces deux groupes d'âge ont davantage choisi des positions centrales, comme le suggère la sélection fréquente de la Boîte n°4 par les enfants de pré-maternelle par exemple. Cependant, nos résultats ne permettent pas de déterminer si les choix opérés par les enfants les plus jeunes étaient liés à une difficulté à mémoriser la position de l'item cible en modalité verticale, ou à une incertitude qui inciterait les participants à envisager que l'item aurait pu être dissimulé dans un nouvel emplacement en modalité horizontale. Cette distinction aurait été possible si la réponse au dernier essai sagittal (Essai 6) avait été enregistrée, mais seule la réponse donnée à l'essai test (Essai 7) a été retenue dans le protocole de cette étude. Néanmoins, nos résultats restent en accord avec la littérature qui ne reporte aucun biais spatial dans le traitement de l'information sérielle non labellisée chez les enfants du même âge (voir McCrink et al., 2017, pour un protocole analogue, et West & McCrink 2021, pour des mesures basées sur l'oculométrie).

En accord avec nos hypothèses, cette étude a permis de mettre en évidence un biais spatial chez nos participants adultes. Ces derniers ont en effet sélectionné la Boîte n°2 significativement plus fréquemment que des boîtes incongruentes (Boîte n°1, 3, 4 et 6) mais également plus fréquemment que la Boîte n°5 (caractéristique d'une spatialisation inversée). Ces résultats indiquent que les participants ont spontanément encodé l'axe horizontal en procédant de la gauche vers la droite afin de rechercher la position cible au moment du test. Comme évoqué dans le Chapitre 1, les différents items d'une séquence tendent à être spatialisés au sein d'un espace mental lors d'une tâche de mémorisation nécessitant la manipulation d'information séquentielle sans support matériel. Ces représentations spatiales peuvent prendre différentes orientations, telles qu'une ligne mentale verticale (e.g., Hartmann et al., 2021 ; Zhou et al., 2019) ou horizontale (pour une synthèse, voir Guida & Campitelli, 2019). Lorsque le codage spatial est effectué sur un plan horizontal, les éléments sont spatialisés de la gauche vers la droite, en fonction de leur position dans la séquence mémorisée. Dans la présente étude, nos résultats suggèrent qu'un même biais spatial peut se manifester lorsque l'information sérielle est traitée sur le plan perceptuel (i.e., sur l'espace physique de l'individu plutôt qu'au sein d'un espace mental).

Les travaux réalisés par West et McCrink (2021) s'opposent aux résultats de notre première expérience, les auteurs n'ayant pas reporté de biais spatial chez les participants adultes recrutés dans leur étude. Il est cependant à noter que plusieurs divergences existent entre les protocoles expérimentaux, par exemple sur la manière d'administrer la tâche : en version numérique pour West et McCrink (2021) *vs.* en « situation réelle » dans notre tâche ; ou encore la manière de mesurer le biais spatial : *via* l'oculométrie dans l'étude de West et McCrink (2021) *vs.* par le biais d'une réponse explicite donnée par le participant dans la présente étude (à la manière de McCrink et al., 2017). Les auteurs ont notamment discuté ce dernier aspect, en proposant que la mesure oculaire pourrait refléter une incertitude dans le processus décisionnel des participants plus âgés. En effet, le laps de temps important laissé aux participants pour examiner l'axe horizontal lors de la phase de test pourrait avoir induit une baisse de vigilance provoquée par l'ennui, poussant les participants à balayer du regard toutes les localisations présentées, au lieu de fixer uniquement la localisation cible. Un second argument avancé pour justifier l'absence de biais significatif chez les adultes concerne la nature de la tâche. Considérée par les auteurs comme trop simple, avec une solution intentionnellement vague, celle-ci aurait pu inciter les participants à développer des stratégies alternatives pour répondre à la question finale, brouillant ainsi les réponses oculaires. Dans notre étude, les participants adultes étaient informés que la tâche serait volontairement très facile car proposée à des participants beaucoup plus jeunes. Il était donc demandé aux adultes de ne pas trop analyser la question posée au moment du test et de donner la première réponse qui leur venait à l'esprit. Cette précision a pu les amener à écarter des solutions trop complexes, pour se concentrer sur la réponse la plus évidente. L'ajout de cette consigne, associé à la nécessité pour les participants d'identifier explicitement la boîte cible au moment du test, pourrait donc avoir contribué à diminuer la fréquence des réponses incongruentes dans notre étude. Bien qu'il soit difficile de déterminer précisément quel facteur a le plus contribué aux divergences entre nos résultats et ceux de West et McCrink (2021), cette première étude confirme néanmoins qu'un paradigme de transposition de type sagittal/horizontal constitue un outil pertinent pour investiguer la spatialisation chez l'adulte.

Sur le plan développemental, l'absence de spatialisation chez nos participants les plus jeunes combinée à la présence de ce phénomène chez nos participants adultes confirme l'hypothèse que nous avions posée en particulier pour ces groupes d'âges. De manière plus surprenante néanmoins, aucun biais spatial orienté de gauche à droite n'a pu être révélé chez les enfants âgés entre ces deux extrêmes (correspondant aux groupes allant de la moyenne section au CM2). En effet, si les Boîtes n°2 et 5 ont été choisies de manière plus fréquente que les autres boîtes dans ces groupes d'âge, aucune différence significative n'a été constatée entre ces deux positions. La prévalence de ces deux réponses, considérées comme des réponses correctes non-directionnelles, indique

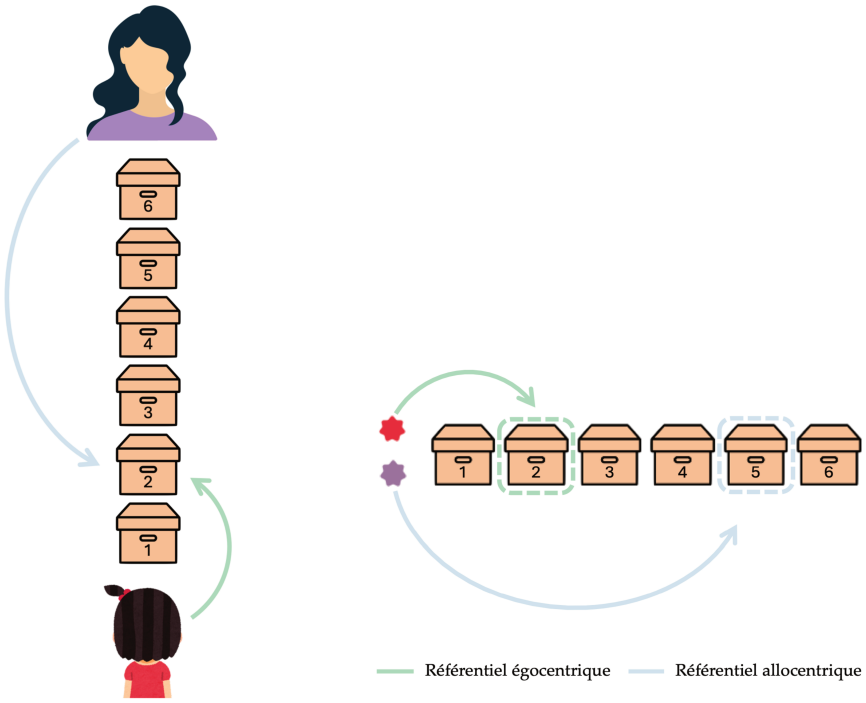
par ailleurs que cette absence de biais ne peut pas être imputée à une mauvaise compréhension de la tâche. En effet, ces participants ont été en mesure d'écarter les boîtes incongruentes pour ne garder en moyenne que les deux réponses les plus plausibles (une tendance qui s'est révélée d'ailleurs être positivement corrélée à l'âge des participants). Pourtant, nous ne sommes pas en mesure de conclure que ces enfants ont traité la série horizontale selon une direction préférentielle, leurs réponses étant indifféremment réparties entre les deux orientations possibles. De tels résultats restent en accord avec nos hypothèses concernant les enfants de moyenne et grande section, pour lesquels nous n'attendions pas de biais spatial[8]. Cependant, sur un plan plus global donc, ces résultats vont à l'encontre de nos prédictions concernant les enfants scolarisés en niveau élémentaire, étant donné que nous anticipions un façonnage progressif du biais gauche-droite à mesure que la maîtrise du langage écrit se développe chez l'enfant.

L'absence d'asymétrie dans les réponses des participants entre la moyenne section et le CM2 pourrait traduire une tendance chez nos participants à encoder des informations sérielles abstraites sans orientation directionnelle stable. Pourtant, l'idée d'un traitement orienté de la droite vers la gauche est difficilement réconciliable avec les pratiques culturelles de nos participants. Bien que nous ne puissions pas contrôler avec précision leurs habitudes langagières (étant donné que leur langue maternelle n'a pas été recueillie dans cette étude), le fait que ces enfants soient scolarisés dans des établissements en France implique déjà une familiarité quotidienne avec des supports pédagogiques favorisant un traitement orienté de gauche à droite. Par conséquent, il est plausible que les réponses inverses observées dans cette étude soient davantage dues à un biais méthodologique introduit par notre protocole. Après un examen plus approfondi de la procédure utilisée, il est apparu que la position adoptée par l'expérimentateur pendant la passation aurait pu influencer les réponses des participants. Une telle influence a par exemple été mise en évidence par Rugani et al. (2022), qui ont montré que des enfants de trois ans tendaient à ancrer leur stratégie de recherche spatiale en lien avec la position (centrale ou latérale) de l'expérimentateur lorsque celui-ci interagissait avec un axe horizontal placé devant eux. Il convient néanmoins de noter qu'une telle influence n'a pas été retrouvée chez des enfants âgés de quatre à six ans dans leur étude. Dans le cadre de notre protocole, nous proposons toutefois que la place de l'expérimentateur ait pu exercer un effet également à des âges plus avancés, notamment lorsque les participants observaient l'expérimentateur manipuler le matériel en modalité sagittale. Étant donné que ce dernier faisait face au participant dans notre

[8] Il est à noter que ces résultats contredisent tout de même ceux de West et McCrink (2021), qui ont détecté un effet significatif chez leurs participants âgés de quatre ans (qui équivaut aux groupes de moyenne et grande section de cette étude). Cependant, les auteurs avaient reparti leur échantillon en quatre groupes, assignés à quatre conditions différentes : label numérique symbolique, label numérique non-symbolique, label alphabétique et label dépourvu de sens. Dû à une absence d'interaction entre le biais spatial et la condition expérimentale, les données ont été regroupées et les auteurs ont testé la présence du biais en prenant en compte l'échantillon global. Le biais détecté pourrait ainsi résulter

protocole, le matériel était placé entre les deux protagonistes. Il est donc possible que certains participants aient adopté un référentiel allocentrique plutôt qu'égocentrique pour encoder la position cible en modalité sagittale. Dans notre tâche, un référentiel égocentrique correspondrait pour le participant à un codage de la position cible par rapport à son propre corps. Adopter ce référentiel pendant la phase d'entraînement correspondrait donc à considérer la boîte cible comme étant la *deuxième* en partant de soi-même. Inversement, un référentiel allocentrique conduirait à coder la position cible par rapport à un indice extérieur. L'indice le plus probable ici pourrait être l'expérimentateur lui-même, dans la mesure où celui-ci était le principal agent de l'action. En adoptant ce référentiel allocentrique pendant la phase d'entraînement, le participant aurait pu considérer ainsi la boîte cible comme étant la *cinquième* en partant de l'expérimentateur (voir le schéma présenté dans la Figure 2.4a). Une fois la série tournée à 90°, les participants pourraient en effet traiter l'axe selon un sens préférentiel gauche-droite, tout en appliquant le référentiel adopté en modalité sagittale pour retrouver la position cible. Ainsi, un participant ayant adopté un référentiel égocentrique pourrait tendre à sélectionner la deuxième boîte en partant de la gauche de l'axe, une réponse considérée comme congruente. De manière plus problématique, un participant ayant adopté un référentiel allocentrique pourrait choisir comme point de départ la gauche de l'axe, mais sélectionner la cinquième boîte au lieu de la deuxième, une réponse que nous considérerions, à tort, comme reflétant un biais inverse (voir la Figure 2.4b). L'Expérience 2 a ainsi été conduite dans le but de limiter l'impact des réponses inverses en modifiant la place de l'expérimentateur.

de l'effet facilitateur des labels, auxquels une majorité des participants (75%) avaient été exposés – une situation qui diffère sensiblement de la présente étude, dans laquelle aucun label n'était utilisé.



(A) Phase d'entraînement (Essais 1 à 6) (B) Phase de test (Essai 7)

FIGURE 2.4 – Exemple de référentiel égocentrique et allocentrique pouvant être appliqué par le participant adoptant un biais gauche-droite et conduisant à des réponses spatialement inversées dans la tâche de transposition de l'Expérience 1

2.3 Expérience 2

2.3.1 Objectif

L'objectif principal de l'Expérience 2 était d'ajuster la position occupée par l'expérimentateur lors de la tâche de transposition. En effet, il est possible que le protocole de l'Expérience 1 ait incité certains participants à recourir à un référentiel allocentrique, en codant la position de l'item cible par rapport à l'expérimentateur placé face à eux. Dans cette configuration, un participant adoptant un tel référentiel aurait pu coder la position cible comme étant la cinquième du point de vue de l'expérimentateur (et non la seconde comme attendu sur la base d'un référentiel égocentrique). Au moment du test, une telle ambiguïté rendait en effet difficile la distinction entre, d'une part, les participants ayant correctement sélectionné la seconde position à partir de la droite (sur la base d'une spatialisation égocentrique inversée), et d'autre part, ceux ayant choisi la cinquième position en partant de la gauche (sur la base d'une spatialisation allocentrique dans le sens attendu). En nous assurant que la boîte cible soit toujours

associée à une même position sérielle (la deuxième en partant du bas de l'axe) quel que soit le référentiel adopté en modalité sagittale, nous espérions obtenir des mesures de la spatialisation moins bruitées que dans la première expérience.

Dans cette deuxième étude, nous avons choisi de ne tester le biais spatial qu'auprès de deux échantillons. Le but de cette démarche était de vérifier dans un premier temps l'efficacité de ce nouveau protocole auprès de groupes d'âges bien distincts. Le premier objectif était de tester le protocole auprès d'un groupe d'âge pour lequel aucun biais spatial n'était supposé a priori, notamment en raison d'une exposition encore limitée aux activités de lecture et d'écriture. Les enfants de pré-maternelle et de petite section ont rapidement été écartés au vu des résultats de l'Expérience 1. En effet, au-delà de l'absence de biais directionnel préférentiel, leurs performances dans l'expérience précédente ont surtout révélé une incompréhension manifeste des consignes, suggérant une inadéquation avec les exigences de la tâche pour ces deux groupes d'âge. Notre choix s'est alors porté sur des enfants de moyenne et de grande section, faisant partie du premier groupe d'âge à avoir sélectionné des réponses correctes non-directionnelles significativement plus que le hasard. En pratique, seules des classes de grande section ont pu être recrutées pour cette deuxième étude. Le second groupe d'âge ayant été sélectionné regroupe des enfants de CM2, correspondant aux enfants les plus âgés de l'école élémentaire. Deux raisons principales ont motivé la sélection de ce groupe d'âge pour évaluer l'amélioration de notre protocole, malgré le fait que ce groupe ait été sous-représenté dans l'Expérience 1 (dans laquelle les enfants provenaient majoritairement de CM1). Premièrement, le biais spatial étant supposé se renforcer avec l'expertise en lecture et en écriture, ce groupe d'âge constituait celui où l'observation d'un effet significatif était la plus probable en utilisant un protocole moins sensible aux facteurs confondus (compte tenu du fait qu'un biais était déjà visible chez l'adulte dans l'Expérience 1). Deuxièmement, leur différence d'âge avec les enfants de maternelle offrait davantage de chances d'observer une différence significative entre les groupes, dans l'objectif de conclure à un renforcement du biais avec l'âge. Nous envisagions ensuite d'élargir nos investigations à des cohortes d'âges intermédiaires dans le cas où les résultats seraient plus marqués avec ce protocole.

2.3.2 Méthode

2.3.2.1 Participants

Un échantillon composé de 58 enfants a pris part à cette étude. Cet échantillon regroupait 31 enfants scolarisés en grande section de maternelle (âge moyen = 6 ans, $ET = 0.34$) et 27 enfants de CM2 (âge moyen = 11 ans, $ET = 0.31$) ; 50 enfants

étaient droitiers et l'échantillon comprenait un nombre équivalent de filles et de garçons. Concernant l'effectif, l'analyse de puissance a posteriori réalisée sur les échantillons de l'Expérience 1 a indiqué qu'un effectif de 26 participants était suffisant pour les tests binomiaux réalisés (dans l'Expérience 1) pour aboutir à une puissance supérieure à .80. Cet effectif minimum a donc été retenu pour cette deuxième expérience (l'effectif en grande section étant légèrement plus élevé en raison d'un sur-recrutement des participants).

2.3.2.2 Matériel

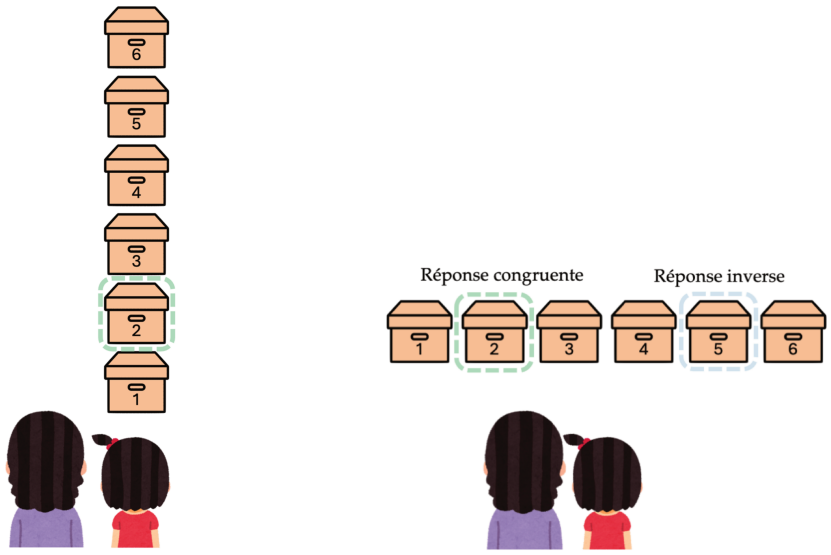
Le matériel utilisé était identique à celui de l'Expérience 1.

2.3.2.3 Procédure

La procédure était identique à celle utilisée dans l'Expérience 1, à l'exception de quelques ajustements. Premièrement, l'expérimentateur était placé à gauche du participant (voir la Figure 2.5) durant la phase d'entraînement et la phase de test. Cette modification visait à garantir une concordance entre une position sérielle codée sous un référentiel égocentrique (du point de vue du participant) et une position codée sous un référentiel allocentrique (du point de vue de l'expérimentateur). Étant donné que les deux protagonistes étaient positionnés de la même façon par rapport à l'axe, la boîte cible était ainsi toujours considérée comme la deuxième boîte, que ce soit en partant du participant ou de l'expérimentateur. Cette configuration devait permettre, une fois l'axe placé à l'horizontale, de mieux distinguer les participants sélectionnant la deuxième boîte en partant de la gauche de ceux choisissant la deuxième en partant de la droite. Une autre différence résidait dans la tentative de limiter les réponses incongruentes en appliquant aux enfants la même précaution que celle prise avec les participants adultes de l'Expérience 1. Tous les enfants ont ainsi été informés de la simplicité de la tâche : il leur était précisé que l'expérience avait initialement été conçue pour des enfants plus jeunes, et qu'en dépit de son apparente facilité, elle ne comportait aucun piège. Ils étaient alors invités à répondre spontanément, en donnant la première réponse qui leur venait à l'esprit au moment du test. De plus, un bandeau a systématiquement été utilisé pour cacher les yeux des enfants au moment de la rotation, et ce pour s'assurer du caractère subreptice de la transposition.

Afin d'affiner nos analyses statistiques, les réponses des enfants données lors du dernier essai en condition sagittale ont enfin été reportées par l'expérimentateur. Cet ajustement a notamment permis de distinguer les résultats des enfants ayant correctement mémorisé la position de l'item cible lors de la phase d'entraînement de ceux

n'ayant pas pu construire une représentation mnésique stable de son emplacement. Au-delà de permettre une interprétation plus nuancée des réponses incongruentes données par les participants, cette distinction apparaît également critique pour l'analyse du biais spatial. En effet, McCrink et al. (2017) ont par exemple détecté un biais significatif dans leur condition alphabétique uniquement après avoir restreint leur analyse aux participants ayant correctement mémorisé la position de l'item en modalité verticale. Toutes les autres étapes de la procédure étaient identiques à celles de l'Expérience 1.



(A) Phase d'entraînement (Essais 1 à 6) (B) Phase de test (Essai 7)

FIGURE 2.5 – Configurations spatiales des essais d'entraînement et de test pour l'Expérience 2. *Note.* La numérotation visible sur la figure a été ajoutée à des fins de clarté ; les boîtes n'ayant pas été associées à des labels numériques lors de la tâche expérimentale.

Analyse des données De la même manière que pour l'Expérience 1, les réponses des participants ont été codées comme « Congruentes », « Inverses » ou « Incongruentes » en fonction de la boîte sélectionnée au moment du test. La démarche pour analyser les résultats de cette deuxième étude était la suivante : tout d'abord, des χ^2 d'ajustement ont été effectués pour vérifier si la distribution des réponses parmi les six boîtes différait d'une distribution due au hasard. Nous avons ensuite appliqué un premier test binomial pour évaluer si les Boîtes n°2 et 5 (toutes deux considérées comme des réponses correctes non-directionnelles) étaient sélectionnées au-delà du hasard pour chaque groupe d'âge. Cette étape préliminaire visait à s'assurer que les participants avaient compris la tâche et avaient répondu de façon cohérente, avant toute considération d'un biais directionnel.

Concernant l'analyse du biais spatial, une deuxième série de tests binomiaux a été effectuée dans le but d'évaluer si une boîte donnée (par exemple, la Boîte n°2) avait été choisie significativement plus que le hasard. Enfin, pour mieux contraster les choix congruents des choix inverses (très fréquemment observés dans l'Expérience 1), une troisième série de tests binomiaux a été exécutée, comparant directement les choix entre la Boîte n°2 et la Boîte n°5. Pour statuer d'un biais spatial orienté de gauche à droite, il était nécessaire que les choix en faveur de la Boîte n°2 soient effectués de manière significativement plus fréquente que ceux en faveur de la Boîte n°5, un résultat que nous anticipions uniquement pour le groupe de CM2. Cette dernière analyse a été menée non seulement sur l'ensemble de l'échantillon, mais aussi en ne sélectionnant que les enfants ayant correctement mémorisé la position de l'item cible lors de la phase d'entraînement (labellisés sous le code M_+ dans les analyses subséquentes). Cette approche a permis de contrôler l'influence des participants n'ayant pas correctement encodé la position spatiale de l'item cible lors des essais sagittaux.

2.3.3 Résultats

En amont des analyses prévues, un premier χ^2 d'indépendance a été réalisé dans le but de contraster les réponses obtenues en maternelle et en CM2 dans cette deuxième étude (la distribution des réponses parmi les six boîtes pour ces deux groupes d'âges est présentée sur la Figure 2.6 et dans le Tableau 2.3). Ce test a mis en évidence une différence significative entre les distributions des deux groupes d'âge ($\chi^2(4) = 9.63$, $p = .047$, V de Cramer $= 0.41$), montrant des patterns de choix différents entre les enfants de maternelle et de CM2, notamment concernant les boîtes incongruentes. Ces résultats indiquent que les participants les plus âgés étaient davantage en mesure d'identifier les boîtes les plus plausibles lors de la phase de test, en cohérence avec les données de l'Expérience 1.

Les χ^2 d'ajustement effectués sur les distributions de réponses entre les six boîtes pour chaque groupe d'âge ont indiqué que celles-ci différaient significativement d'une distribution liée au hasard ($\chi^2(5) = 24.16$, $p < .001$, W de Cohen $= 0.88$ pour les enfants en GS ; et $\chi^2(5) = 59.44$, $p < .001$, W de Cohen $= 1.43$ pour le CM2). Nous avons ensuite évalué si les réponses correctes non-directionnelles étaient choisies à une fréquence plus élevée que le hasard (la probabilité théorique de choisir la Boîte n°2 ou la Boîte n°5 étant fixée à $\pi = \frac{2}{6}$). Les résultats se sont avérés significatifs, à la fois pour les enfants de GS et de CM2 (71 % et 100 % des réponses respectivement, $p < .001$ dans les deux cas, $h \geq 0.55$ de Cohen).

Ensuite, des tests binomiaux ont été effectués pour déterminer si les enfants avaient manifesté une préférence pour la Boîte n°2 uniquement (la probabilité théorique de

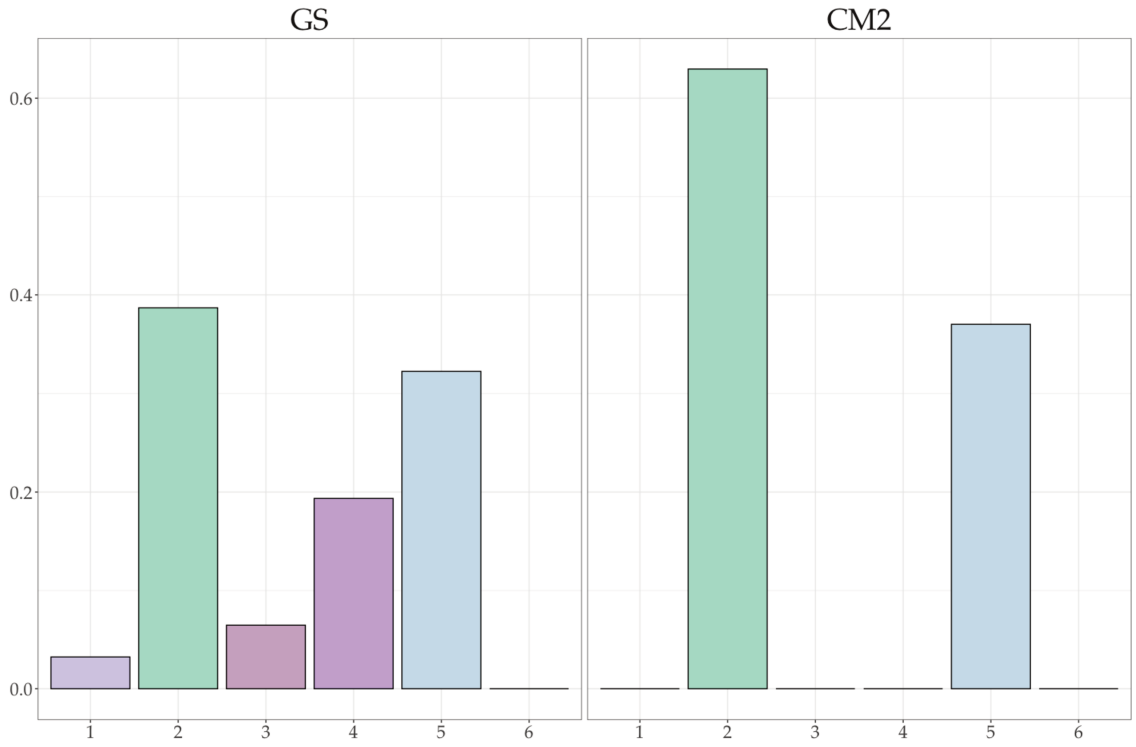


FIGURE 2.6 – Distribution des réponses entre les six boîtes pour chaque groupe d'âge de l'Expérience 2

choisir cette boîte étant fixée à $\pi = \frac{1}{6}$). Les résultats étaient significatifs pour les enfants de GS ($p = .003$, h de Cohen $= 0.36$) et de CM2 ($p < .001$, h de Cohen $= 0.70$). Une dernière série de tests binomiaux a enfin été effectuée pour estimer si la Boîte n°2 avait été choisie plus souvent que la Boîte n°5 (les proportions observées étant comparées à des proportions théoriques de $\pi = \frac{1}{2}$). Les résultats n'ont pas indiqué que la Boîte n°2 était significativement plus choisie que la Boîte n°5, que ce soit en GS ou en CM2 (voir le Tableau 2.3 pour les résultats de ce test). Ces derniers tests binomiaux ont également été effectués sur les participants M_+ uniquement (i.e., les enfants ayant choisi la bonne boîte au cours du dernier essai en sagittal). Sur la base de ce critère, quatre participants en GS ont été exclus de l'analyse, ce qui n'a toutefois pas modifié le pattern de résultats ($p = .5$, h de Cohen $= 0.04$). Les enfants de CM2 avaient par ailleurs tous correctement mémorisé la boîte cible.

Comparaison avec l'Expérience 1. Pour affiner notre analyse, une comparaison directe entre les résultats de l'Expérience 1 et de l'Expérience 2 a été réalisée. Malgré une légère variation dans la composition des groupes entre les deux études, les résultats ont été comparés par groupe d'âge : les enfants de CM2 ont été comparés au groupe combiné de CM1 et CM2 de l'Expérience 1. De la même manière, les enfants de GS de la présente étude ont été comparés au groupe d'enfants qui étaient soit en MS soit

en GS dans l'Expérience 1 (le Tableau 2.3 rappelle les proportions obtenues dans la première expérience pour chaque groupe d'âge). Pour les enfants de maternelle, le χ^2 d'indépendance n'a montré aucune différence dans la distribution des réponses parmi l'ensemble des boîtes entre les deux expériences ($\chi^2(5) = 7.95$, $p = .159$). Pour les enfants en fin d'école élémentaire, les résultats ont par ailleurs indiqué une différence significative dans le pattern de réponses entre les deux expériences ($\chi^2(3) = 8.53$, $p = .036$, V de Cramer $= 0.40$).

Afin de mieux modéliser la progression des réponses caractéristiques d'un biais spatial orienté de gauche à droite, une régression logistique a été réalisée sur les réponses congruentes (notées 1, contre 0 pour les autres réponses). Cette analyse a montré une interaction significative entre le facteur Expérience (2 niveaux, Exp.1 *vs.* Exp.2) et le Groupe d'âge (2 niveaux également, Maternelle *vs.* Fin d'école élémentaire, $z = 2.3$, $p = .021$, $\beta Std. = 0.44$, voir le Tableau B.2 en Annexe B pour le détail de cette analyse). En complément, la même analyse a été réalisée cette fois-ci en prenant en compte les réponses inverses (notées 1, contre 0 pour les autres réponses). Aucune variation significative entre les deux expériences n'a pu être mise en évidence, tant sur l'ensemble des participants ($z = 0.73$, $p = .465$, $\beta Std. = 0.14$), que lorsqu'une interaction avec le groupe d'âge était prise en compte ($z = -1.82$, $p = .068$, $\beta Std. = -0.36$, voir le Tableau B.2 en Annexe B pour le détail de cette analyse). Ainsi, l'évolution des performances entre les deux expériences s'est principalement traduite par une hausse des réponses congruentes chez les enfants plus âgés. Cependant, malgré cette progression, aucun biais gauche-droite significatif n'a pu être détecté chez ces participants, les réponses inverses demeurant encore trop fréquentes dans cette deuxième étude.

Tableau 2.3 – Distribution des réponses entre les six boîtes pour les groupes de MS & GS et CM1 & CM2 de l'Expérience 1 et les groupes de GS et CM2 de l'Expérience 2

	N	B n°1	B n°2 (%)	B n°3	B n°4	B n°5	B n°6	B n°2 + B n°5 (%)	*p*-valeur B n°2 *vs.*B n°5
					Expérience 1				
MS & GS	38	5	**17 (45%)***	2	2	9	3	**26 (68%)***	$p = .080$
CM1 & CM2	26	1	7 (27%)	0	0	**16***	2	**23 (88%)***	$p = .046$
					Expérience 2				
GS	31	1	**12 (39%)***	2	6	10	0	**22 (71%)***	$p = .420$
CM2	27	0	**17 (63%)***	0	0	**10***	0	**27 (100%)***	$p = .120$

Note. Pour chaque boîte considérée isolément, un test binomial bilatéral basé sur une probabilité fixée à $\pi = \frac{1}{6}$ a été réalisé pour déterminer si les proportions de réponses différaient de celles attendues sous l'hypothèse du hasard. Une probabilité $\pi = \frac{2}{6}$ a été utilisée pour estimer si les choix associés à la Boîte n°2 ou à la Boîte n°5 ont été significativement supérieurs au hasard. Les valeurs en **gras*** sont celles ayant atteint le seuil de significativité. Une probabilité $\pi = \frac{1}{2}$ a enfin été utilisée pour déterminer si la Boîte n°2 avait été choisie plus fréquemment que la Boîte n°5 (ou inversement). Le seuil de la *p*-valeur a été fixé à $\frac{0.05}{2} = .025$ après correction de Bonferroni.

2.3.4 Discussion

L'objectif de cette deuxième expérience était d'atteindre une meilleure détection d'un biais spatial en modifiant la place de l'expérimentateur, un facteur pouvant influencer les réponses des participants dans des tâches de localisation spatiale (Rugani et al., 2022). En plaçant l'expérimentateur dans la même position que le participant par rapport à l'axe, il était espéré que l'ambiguïté concernant la position cible à retrouver en modalité horizontale serait réduite, permettant ainsi de mieux distinguer des réponses caractéristiques d'un biais gauche-droite *vs.* d'un biais droite-gauche. Compte tenu des résultats de l'Expérience 1, deux groupes d'âge spécifiques ont été sélectionnés : les enfants scolarisés en grande section de maternelle et les enfants de CM2. Une différence significative était attendue entre les réponses de ces deux groupes d'âge, le biais spatial ne devant apparaître plus fréquemment que chez les participants plus âgés.

Les résultats de cette deuxième étude ont effectivement montré une différence significative dans les deux groupes. Cependant, cette divergence dans le pattern de réponse s'est principalement caractérisée par une plus faible proportion de choix incongruents chez les participants les plus âgés. Quel que soit le groupe d'âge, les participants ont montré une propension à sélectionner la boîte congruente dans des proportions supérieures au hasard (39% en GS ; 63% en CM2), tout en manifestant également une part non négligeable de réponses inverses (31% en GS, sans néanmoins atteindre le seuil de significativité ; 37% pour le CM2). Le test critique opposant ces deux types de réponse n'a pas permis de trancher en faveur d'une plus nette direction spatiale. En contrastant de manière plus fine nos résultats avec ceux de l'étude précédente, une interaction significative a pu être mise en évidence entre expériences et tranches d'âge. Cet effet significatif était notamment caractérisé par une plus grande augmentation des réponses congruentes chez les participants les plus âgés. Néanmoins, en raison des disparités entre les groupes comparés en matière d'âge et de scolarité, il demeure difficile d'imputer fiablement cette évolution à la seule modification de notre protocole expérimental. Cette limitation reste relative, dans la mesure où, contrairement aux prédictions, aucun biais spatial significatif n'a pu être mis en évidence dans cette seconde étude.

Nous pourrions conclure que les enfants en fin d'école élémentaire ne disposent pas encore d'une prédisposition suffisamment ancrée à traiter l'information sérielle de gauche à droite lorsque celle-ci n'est pas explicitement associée à des indices numériques ou alphabétiques. Toutefois, il convient de considérer qu'un facteur confondu pourrait expliquer ces résultats inattendus. Rappelons que modifier la place de l'expérimentateur avait ici pour but d'empêcher le participant de coder l'ordre de la série en partant de la boîte la plus éloignée de lui. Toutefois, il est possible que cette tendance ait persisté chez certains participants malgré cet ajustement. L'interprétation que nous proposons ici pour expliquer ce mécanisme se base sur l'analogie de la *page blanche*, qui découle de

la théorie du tableau mental proposée par Abrahamse et al. (2014). Cette hypothèse, directement liée au SPoARC vertical identifié par Hartmann et al. (2021), stipule que, sur un continuum vertical, les premiers éléments d'une séquence sont préférentiellement spatialisés en haut de l'espace mental et les derniers en bas. Ce sens préférentiel rappelle la manière dont l'individu issu d'une culture occidentale lit communément un texte sur une feuille de papier (en commençant par le haut de la page et en progressant vers le bas). Tel qu'il a été proposé, notre protocole a pu laisser la possibilité aux participants d'encoder la série dans cette direction, étant donné que l'expérimentateur cachait directement l'item dans la boîte cible, sans passer en revue les autres options dans une orientation donnée (i.e., sans indiquer un chemin pour accéder à la boîte). L'emplacement cible pouvait alors être associé à la cinquième position en partant de la boîte la plus éloignée plutôt qu'à la deuxième en partant du bas de la série, comme si le participant ancrait son point de départ en haut d'une page blanche et traitait la série en procédant vers le bas. Il pourrait résulter alors une confusion similaire à celle constatée dans l'Expérience 1 : une sélection de la cinquième boîte fondée sur un biais gauche-droite en modalité horizontale.

Par ailleurs, une contre-interprétation peut être avancée dans la mesure où un SPoARC sagittal a également été mis en évidence dans des travaux récents (Attout et al., 2025). Dans cette étude, les participants utilisaient des touches disposées sur un continuum sagittal pour répondre à une tâche classique de spatialisation. Les résultats ont indiqué des associations entre ordre et espace contradictoires avec le SPoARC vertical de Hartmann et al. (2021). Les premiers items étaient en effet associés préférentiellement à une localisation adjacente au corps, et les derniers items associés à une localisation plus éloignée de l'axe corporel. L'axe présenté dans cette étude étant disposé sagittalement et non verticalement, il n'est pas déraisonnable d'envisager qu'un tel continuum proximal/distal ait pu être adopté par les participants. Cependant, la littérature actuelle ne nous permet pas de statuer en faveur de l'une ou l'autre des interprétations proposées, les études du SPoARC vertical et sagittal ayant toutes deux été réalisées auprès d'adultes. En l'absence de données développementales (voir cependant Cooney et al., 2021, pour des résultats liés au SNARC), il est difficile de conclure quant au type d'encodage spatial que les enfants auraient pu privilégier pendant la tâche. Pour remédier à cette limite, l'Expérience 3 propose d'ajuster la phase d'entraînement de sorte qu'elle permette un encodage clair et structuré de la série, permettant à tous les participants de traiter l'information sérielle selon une direction similaire.

2.4 Expérience 3

2.4.1 Objectif

Bien que la position de l'expérimentateur ait été ajustée pour coïncider avec celle des participants dans l'Expérience 2, la nature de la tâche n'a pas permis de garantir un point d'ancrage commun aux participants pour encoder l'ordre de la série en modalité sagittale, laissant subsister une incertitude quant au référentiel utilisé. Nous pensons que les réponses de l'expérience précédente peuvent être interprétées comme le reflet de deux référentiels possibles, adoptés pendant la phase d'entraînement. Le premier serait de nature égocentrique, amenant à coder l'emplacement cible comme étant en deuxième position en partant de son propre corps. Le second s'appuierait davantage sur les habitudes de lecture et d'écriture, incitant à coder la position des boîtes en partant du sommet d'une page imaginaire.

Afin de clarifier ce point, l'Expérience 3 propose une nouvelle approche, simulant cette fois-ci le trajet parcouru par l'animal pour atteindre sa cachette afin de lever l'ambiguïté sur le point de départ adopté. La boîte cible a également été contrebalancée entre la Boîte n°2 et la Boîte n°5 afin de mieux généraliser les résultats. Pour cette troisième étude, nous avons restreint davantage la tranche d'âge en ne sélectionnant que des élèves de CM2, plus enclins à manifester un biais spatial selon l'hypothèse d'enculturation. Nous avions planifié de tester d'autres groupes d'âge, à la condition d'obtenir un résultat concluant avec les enfants les plus âgés.

2.4.2 Méthode

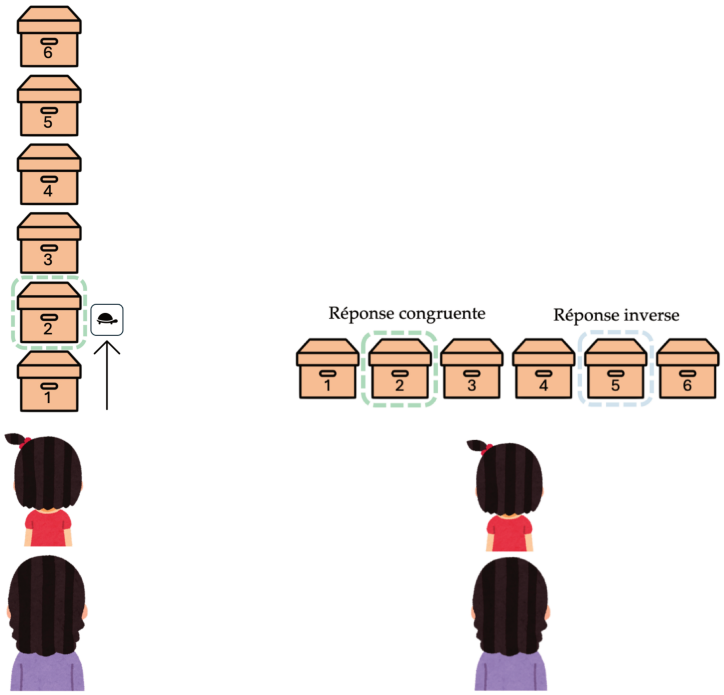
2.4.2.1 Participants

Un échantillon de 32 enfants de CM2 (âge moyen = 10.3 ans, $ET = 0.5$) a participé à cette expérience ; 29 participants étaient droitiers et l'échantillon comprenait 21 filles et 11 garçons. Le nombre de participants correspondait à la taille de l'échantillon des deux expériences précédentes.

2.4.2.2 Matériel et procédure

Le matériel et la procédure étaient similaires à l'Expérience 2, à l'exception que la position de l'expérimentateur a été réajustée afin de ne pas biaiser la mesure de spatialisation. Au lieu d'être placé à gauche, l'expérimentateur était placé derrière l'enfant (Essais 6 et 7, comme indiqué sur la Figure 2.7), sauf quand l'expérimentateur devait

manipuler le matériel pour y dissimuler l'item à la vue du participant (Essais 1 à 5) ; dans ce cas, il se plaçait alternativement à sa gauche ou à sa droite, avec un contrebalancement systématique de cette position entre les essais. La position initiale de l'expérimentateur était également contrebalancée entre les participants.



(A) Phase d'entraînement (Essais 1 à 6) (B) Phase de test (Essai 7)

FIGURE 2.7 – Configurations spatiales des essais d'entraînement et de test pour l'Expérience 3. *Note.* Cette configuration a été appliquée pour 50% des participants. Pour l'autre moitié de l'échantillon, l'item était dissimulé dans la cinquième boîte en partant du bas/de la gauche de l'axe. La numérotation visible sur la figure a été ajoutée à des fins de clarté ; les boîtes n'ayant pas été associées à des labels numériques lors de la tâche expérimentale.

En accord avec la littérature (McCrink et al., 2017 ; West & McCrink, 2021), la position ciblée pendant la phase d'entraînement a également été contrebalancée entre les participants. Ainsi, pour la moitié de l'échantillon, l'item était systématiquement placé dans la deuxième boîte en partant du participant, et dans la cinquième boîte pour l'autre moitié. Pour s'assurer que ces positions étaient codées de manière uniforme pour tous les participants, l'expérimentateur simulait le trajet de l'animal en faisant progresser la carte d'une boîte à l'autre, en commençant systématiquement par la boîte la plus proche du participant (Essais 1 à 5). Pour accompagner ce mouvement, un petit bruit était effectué par l'expérimentateur pendant environ 3 secondes (la durée du bruit étant identique quelle que soit la boîte cible, n°2 ou n°5). Le même bruit était appliqué à l'Essai 6 et à l'Essai 7, lors desquels l'enfant avait les yeux fermés, pour les faire coïncider aux cinq premiers essais. Cette concordance entre temps et

espace devait renforcer l'idée que l'animal suivait systématiquement le même trajet, indépendamment du fait que l'enfant ait les yeux ouverts ou fermés.

Étapes additionnelles Des étapes supplémentaires ont été ajoutées au protocole utilisé jusqu'à présent. Une fois la rotation effectuée, les participants devaient désigner la boîte où ils pensaient que la carte cadeau avait été cachée, sans toutefois l'ouvrir. Une fois la réponse enregistrée, l'expérimentateur demandait alors aux participants de compter les boîtes une à une. Le côté choisi pour commencer à compter (à gauche ou à droite de l'axe) était noté par l'expérimentateur. Ensuite, les participants devaient fermer les yeux pendant que l'expérimentateur tournait les boîtes pour les remettre dans leur alignement sagittal d'origine. Une fois de plus, les participants devaient compter les boîtes tandis que l'expérimentateur notait si le point de départ adopté était proximal (correspondant à la boîte la plus proche) ou distal (correspondant à la boîte la plus éloignée). Par la suite, l'expérimentateur demandait aux participants de replacer les boîtes sur un plan horizontal pour observer comment ils effectuaient spontanément la rotation. L'expérimentateur notait si la rotation avait été réalisée dans un sens horaire ou antihoraire. Enfin, les participants étaient autorisés à ouvrir la boîte choisie précédemment afin de retrouver la carte cachée.

2.4.3 Résultats

Les réponses ont été codées comme « Congruentes » lorsqu'elles correspondaient au biais spatial gauche-droite attendu (i.e., lorsque les participants choisissaient la Boîte n°2 ou la Boîte n°5 selon l'emplacement ciblé pendant la phase d'entraînement). Les réponses ont été considérées comme « Inverses » lorsqu'elles correspondaient à un traitement spatial orienté de droite à gauche. Les autres réponses ont été considérées comme « Incongruentes ». Les résultats ont montré que 47% des participants (soit 15 participants sur 32) ont donné une réponse congruente à l'essai final, contre 50% (16 participants) ayant donné une réponse inverse. Seul un participant (3% des réponses) a opté pour une boîte incongruente au moment du test (Boîte n°3, voir la Figure 2.8 pour la distribution des réponses).

La distribution entre les réponses congruentes, inverses et incongruentes différait d'une distribution uniforme ($\chi^2(2) = 13.19$, $p = .001$, W de Cohen $= 0.64$). Les participants ont manifesté une bonne compréhension de la tâche et ont choisi des réponses correctes non-directionnelles bien au-delà du hasard (97 % de réponses congruentes ou inverses, $p < .001$, h de Cohen $= 1.1$, la probabilité théorique de choisir une réponse correcte non-directionnelle étant fixée à $\pi = \frac{2}{6}$). En outre, les résultats ont montré que les réponses congruentes ont été réalisées au-delà du hasard ($p < .001$, h de Cohen $= 0.47$, avec $\pi = \frac{1}{6}$). Cependant, le test binomial réalisé pour opposer ces réponses

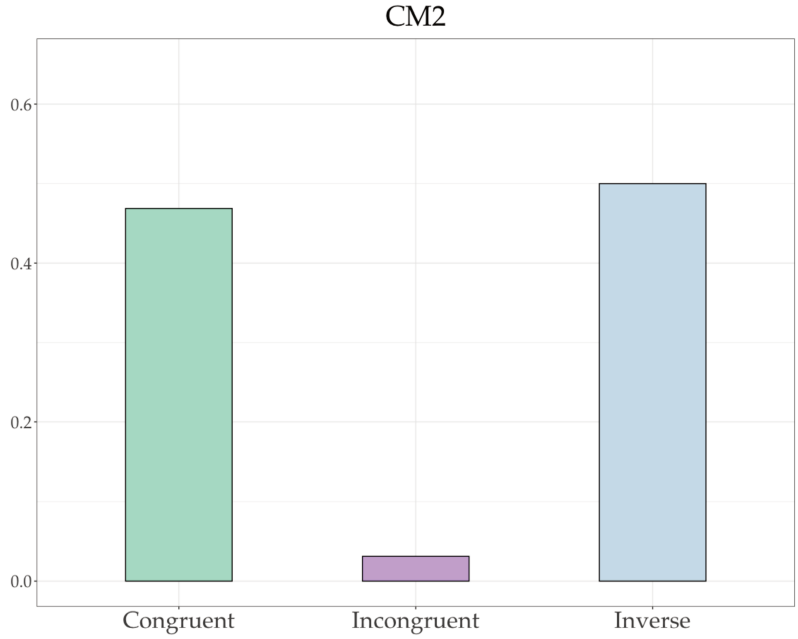


FIGURE 2.8 – Distribution des réponses obtenues dans l'Expérience 3

aux réponses inverses (avec une probabilité théorique $\pi = .5$) n'a pas atteint le seuil de significativité ($p = 1$). Ce pattern de résultats est par ailleurs resté inchangé dans l'analyse effectuée sur les enfants ayant correctement rappelé la position de l'item lors du dernier essai en modalité sagittale ($p = 1$ pour les participants M_+, correspondant à 97% de l'échantillon). Ces résultats s'alignent avec ceux des deux expériences précédentes, dans la mesure où les participants n'ont pas préférentiellement choisi une boîte congruente avec un biais spatial orienté de gauche à droite.

Les tests binomiaux effectués sur les réponses données lors des étapes additionnelles ont indiqué que chacune des trois distributions (liées respectivement au comptage en modalité horizontale, en modalité sagittale ou à la tâche de rotation) différait d'une répartition théorique basée sur $\pi = \frac{1}{2}$ ($p < .001$, h de Cohen $= 0.48$ pour la modalité horizontale ; $p < .001$, h de Cohen $= 0.67$ pour la modalité sagittale ; et $p = .025$, h de Cohen $= 0.27$ pour la tâche de rotation). Les participants ont commencé à compter significativement plus à partir de la gauche de l'axe horizontal (81% des participants) que de la droite (19%). Une tendance plus tranchée encore a été observée en modalité sagittale, avec 91% des participants débutant leur comptage par la boîte proximale, contre 9% choisissant la boîte distale comme point de départ. Pour la tâche de rotation, une préférence significative a été observée en faveur d'une rotation antihoraire (69% des participants ayant tourné l'axe dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, contre 31% ayant effectué une rotation dans le sens horaire). Aucune relation significative n'a par ailleurs été observée entre le sens de la rotation et le côté à partir duquel les

participants commençaient à compter, que ce soit sur l'axe horizontal ($\chi^2(1) = 0.73$, $p = .39$) ou sagittal ($\chi^2(1) = 1.50$, $p = .22$). Les participants tendaient ainsi à débuter leur comptage en privilégiant le côté gauche et le côté proximal, indépendamment de la manière dont ils avaient exécuté la rotation, comme en témoignent les coefficients de contingence observés ($C = .15$ pour la relation rotation/comptage horizontal et $C = .21$ pour la relation rotation/comptage sagittal).

Nous avons ensuite cherché à mettre en lien les réponses données lors de la tâche principale avec celles recueillies lors des étapes additionnelles, en débutant par la tâche de comptage en modalité horizontale. Cette première analyse visait à investiguer si une correspondance pouvait être observée entre la stratégie spatiale adoptée pour retrouver la position cible au moment du test et celle adoptée pour dénombrer les boîtes. Sous l'hypothèse d'une relation entre ces deux variables, des réponses congruentes devraient être associées à un comptage débutant par la gauche, tandis que des réponses inverses devraient davantage être liées à un comptage débutant par la droite. Un premier χ^2 d'indépendance a révélé que la distribution des réponses congruentes, inverses et incongruentes variait selon le point de départ adopté par les participants ($\chi^2(2) = 6.18$, $p = .045$, Cramer $V = 0.44$, voir le Tableau 2.4). Pour affiner ces résultats, des tests binomiaux unilatéraux ont été conduits en comparant directement les proportions de réponses congruentes *vs.* inverses pour chaque sous-groupe (les participants ayant commencé à gauche et ceux ayant démarré à droite). Cette analyse n'a par ailleurs pas indiqué que les proportions observées différaient significativement de celles attendues sous l'hypothèse du hasard ($p = .42$ pour les participants ayant commencé par la gauche et $p = .19$ pour les participants ayant commencé par la droite), suggérant une indépendance entre les deux stratégies adoptées. Les résultats n'ont pas non plus montré de relation entre la distribution des réponses congruentes, inverses et incongruentes et le point de départ adopté en modalité sagittale ($\chi^2(2) = 0.42$, $p = 0.81$, voir le Tableau 2.4).

Néanmoins, une relation entre la distribution des réponses et le sens de rotation a pu être mise en évidence ($\chi^2(2) = 10.88$, $p = .004$, V de Cramer $= 0.58$). Les participants ayant exécuté une rotation dans le sens horaire ont en effet produit significativement plus de réponses congruentes que de réponses inverses ($p = .01$, h de Cohen $= 0.66$), tandis que les participants ayant exécuté une rotation dans le sens antihoraire ont produit plus de réponses inverses que de réponses congruentes ($p = .039$, h de Cohen $= 0.31$). Ces résultats sont illustrés dans la Figure 2.9 et le Tableau 2.5. Ainsi, sur l'ensemble des trois tâches additionnelles proposées, les réponses données à l'essai test se sont avérées être davantage liées au sens de rotation appliqué par les participants qu'à leurs stratégies de comptage, comme le montrent les coefficients de contingence calculés ($C = 0.5$ pour la rotation ; contre 0.4 pour le comptage en modalité horizontale et 0.11 pour le comptage en modalité sagittale).

Tableau 2.4 – Tableau de contingence de la distribution des réponses congruentes, inverses et incongruentes en fonction du point de départ adopté pour la tâche de comptage de l'Expérience 3

Point de départ du comptage	Réponses (%) Congruentes	Incongruentes	Inverses
	Disposition horizontale		
Gauche	14 (54.0%)	0 (0.0%)	12 (46.0%)
Droite	1 (16.5%)	1 (16.5%)	4 (67.0%)
	Disposition sagittale		
Proximal	14 (48.0%)	1 (4.0%)	14 (48.0%)
Distal	1 (33.5%)	0 (0.0%)	2 (66.5%)

Figure 2.9 – Distribution des réponses obtenues dans l'Expérience 3 en fonction du sens de rotation (horaire *vs.* antihoraire)

Tableau 2.5 – Tableau de contingence de la distribution des réponses congruentes, inverses et incongruentes selon le sens de rotation effectué dans l'Expérience 3

Sens de rotation	Réponses (%) Congruentes	Incongruentes	Inverses
Sens horaire	9 (90%)	0 (0%)	1 (10%)
Sens antihoraire	6 (27%)	1 (5%)	15 (68%)

Enfin, des χ^2 d'indépendance ont été effectués pour comparer les résultats de l'Expérience 3 à ceux obtenus dans les deux précédentes expériences chez les enfants de CM2 (et de CM1 pour la première étude). Aucune différence significative dans la distribution des réponses congruentes, inverses et incongruentes n'a pu être mise en évidence, que ce soit pour la comparaison avec l'Expérience 1 ($\chi^2(2) = 3.32$, $p = 0.19$) ou avec l'Expérience 2 ($\chi^2(2) = 2.10$, $p = 0.35$, voir le Tableau 2.6 pour un rappel des proportions observées dans chaque étude).

Tableau 2.6 – Distribution des réponses congruentes, inverses et incongruentes des Expériences 1, 2 et 3 pour les groupes de CM1 & CM2

	Réponses (%)		
	Congruentes	Incongruentes	Inverses
Expérience 1	7 (27%)	3 (11%)	16 (62%)
Expérience 2	17 (63%)	0 (0%)	10 (37%)
Expérience 3	15 (47%)	1 (3%)	16 (50%)

2.4.4 Discussion

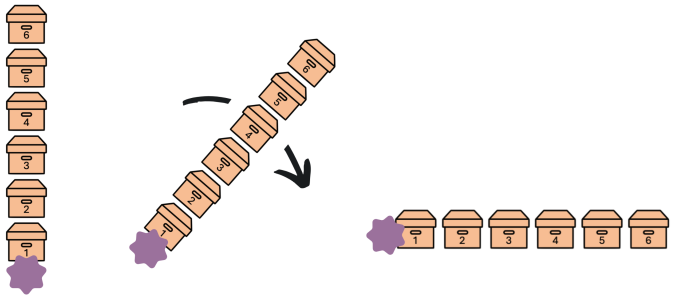
La principale modification proposée dans l'Expérience 3 consistait à montrer au participant une direction lorsque l'axe était orienté sur un plan sagittal. En uniformisant à la fois le référentiel et la direction servant à encoder la position de la boîte cible pendant la phase d'entraînement, nous espérions une meilleure détection d'un biais spatial gauche-droite au moment du test. En dépit de cette manipulation, aucun biais n'a pu être détecté dans cette troisième étude, les participants n'ayant pas manifesté de préférence pour la boîte congruente par rapport à la boîte inverse.

Néanmoins, des stratégies spatiales ont pu être détectées pour les étapes de la tâche qui impliquaient un traitement numérique explicite. Par exemple, dans la tâche de comptage en modalité sagittale, 91% des participants ont initié leur comptage en pointant d'abord la boîte proximale puis en progressant vers la boîte distale, en accord avec la direction induite par l'expérimentateur lors de la phase d'entraînement (et en opposition avec l'hypothèse de la *page blanche*). De manière plus surprenante, un biais orienté de gauche à droite a été détecté chez 81% des participants pour la tâche de comptage en modalité horizontale, alors qu'un tel biais n'a pas pu être mis en évidence dans la tâche principale. Cette manifestation relative de l'effet dans notre étude est en accord avec les résultats de McCrink et al. (2017), qui ont observé une variation du biais spatial en fonction du contexte d'encodage utilisé. Ces auteurs détectaient un effet uniquement lorsque les boîtes étaient désignées par un label numérique (ou alphabétique). De la même manière, le traitement symbolique proposé dans notre tâche de comptage semble avoir favorisé l'émergence d'un biais, en mobilisant des représentations spatiales sur-apprises et conditionnées par les expériences culturelles des participants (Fischer

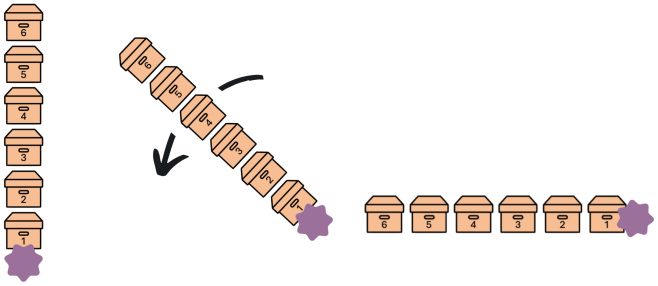
& Brugger, 2011 ; Fischer, 2008 ; Lindemann et al., 2011 ; Shaki et al., 2012). Cette variation du biais spatial en fonction du type d'encodage sériel avait été anticipée dès l'Expérience 1, dans la mesure où nous supposions qu'elle puisse justement expliquer un âge d'apparition plus tardif du biais lorsque l'information sérielle est traitée à un niveau plus abstrait. Cependant, nous nous attendions à observer un biais franc en fin d'école élémentaire, là où l'enfant maîtrise la lecture et l'écriture. Il est par ailleurs possible que la phase de transposition de l'axe d'un plan sagittal à un plan horizontal soit à l'origine de la forte proportion de choix inverses ayant entravé l'observation du biais gauche-droite dans nos résultats. Pour rappel, à l'issue de la phase d'entraînement, il était demandé au participant de fermer les yeux tandis que l'expérimentateur tournait la série de boîtes à son insu. Une fois ses yeux ré-ouverts, le participant était alors confronté à une configuration spatiale inattendue. Dans cette situation, il est plausible que le participant ait tenté de reconstituer mentalement la rotation tout juste effectuée par l'expérimentateur, en opérant une *rotation mentale*. De manière critique, il est possible que le sens de cette rotation mentale (horaire ou antihoraire) ait influencé le point d'ancrage sélectionné pour amorcer le balayage de la série horizontale, entravant ainsi l'expression d'un biais spatial gauche-droite spontané.

Cette hypothèse trouve un écho dans les résultats de la tâche additionnelle, dans laquelle une association entre la direction de la rotation physique choisie par les participants et leur réponse à la tâche principale a été observée. En admettant que cette rotation physique soit la traduction directe d'une rotation mentale préalable (i.e., une reproduction, par l'action, d'une transformation mentale précédemment mobilisée dans la tâche principale), la prépondérance des réponses inverses observée dans nos résultats pourrait alors trouver sa justification. La Figure 2.10 illustre cette hypothèse. Sur cette figure, le point de départ adopté pour coder l'ordre de la série est représenté par une étoile violette. En modalité sagittale, l'étoile est placée sur la boîte la plus proche du participant (un point d'ancrage suggéré par l'expérimentateur au moment de la tâche, mais aussi congruent avec les habitudes de comptage observées dans nos résultats). Dans le cas d'une rotation horaire appliquée sur le matériel, ce point d'ancrage se retrouverait à gauche du participant une fois la série orientée horizontalement (voir la Figure 2.10a). Cette configuration favoriserait alors une lecture spatiale de gauche à droite, conduisant à la production d'une réponse congruente (en accord avec les 90% des participants ayant effectué une rotation horaire lors de la tâche additionnelle et ayant également produit une réponse congruente au moment du test dans cette étude). À l'inverse, une rotation imaginée dans le sens antihoraire placerait le point d'ancrage à droite (voir la Figure 2.10b), induisant le participant à balayer la série horizontale de la droite vers la gauche et à sélectionner la boîte inverse. Cette idée s'aligne également avec nos résultats, qui montrent que 68% des participants ayant effectué une rotation

antihoraire avaient aussi produit une réponse inverse lors du test principal[9].



(A) Sens horaire



(B) Sens antihoraire

FIGURE 2.10 – Exemple des sens de rotation pouvant être appliqués pour passer d'une disposition sagittale à une disposition horizontale

Il s'avère par ailleurs que le sens antihoraire a été majoritairement recruté par les participants de cette étude (69% lors de la tâche de rotation additionnelle). Cette prépondérance de la rotation antihoraire peut trouver son explication dans la littérature. En effet, le sens antihoraire se manifeste régulièrement dans les mouvements rotatifs engagés par l'individu, notamment dans le cadre de sa motricité globale. Lorsqu'il s'agit de courir en suivant une trajectoire circulaire, de tourner autour d'un objet (ou tourner soi-même), le sens antihoraire tend à prédominer, que ce soit chez l'adulte (Gordon et al., 1992 ; Lenoir et al., 2006 ; Mohr et al., 2003, 2004 ; Previc & Saucedo, 1992 ; Seltzer et al., 1990 ; Taylor et al., 2007 ; Yazgan et al., 1996), ou chez l'enfant (Day & Day, 1997 ; Gospe Jr et al., 1990 ; Güneş & Nalçaci, 2006 ; Streuli et al., 2017). Des mouvements circulaires antihoraires sont également retrouvés pour des gestes plus fins, comme l'écriture manuscrite, ce type de rotation étant par exemple prédominant dans le système graphique occidental (voir par exemple Fischer, 2022 ; Thomassen &

[9] Il convient par ailleurs de noter que cette association semble moins automatique, dans la mesure où 27% des participants ayant opté pour une rotation antihoraire ont tout de même produit une réponse congruente. Ce résultat pourrait néanmoins s'expliquer par une compétition entre deux stratégies spatiales : un traitement droite-gauche induit par la rotation antihoraire et un traitement gauche-droite culturellement déterminé (comme révélé par exemple dans la tâche de comptage en modalité horizontale). Cette hypothèse pourrait contribuer à expliquer pourquoi les réponses des participants

Tuelings, 1979). Enfin, dans le cadre de la rotation d'objet (qui nous intéresse tout particulièrement ici), les rotations antihoraires sont les plus fréquentes, comme le montre notre Mini-étude 1 proposée en Annexe B. Dans cette étude, 30 participants adultes ont été invités à effectuer la rotation à 90° d'une page de papier et de leur téléphone. Les résultats ont montré que chacun de ces deux objets avait été pivoté dans un sens antihoraire chez une grande majorité des participants (70% et 83% respectivement). Ces résultats suggèrent que des schèmes moteurs liés à des rotations antihoraires prédominent dans les gestes de l'individu. Cette prédominance motrice, couplée aux travaux ayant établi un lien solide entre gestes rotatifs physiques et rotations mentales (voir par exemple Lacombe & Dias, 2023 ; Wohlschläger & Wohlschläger, 1998 ; Zacks, 2008), vient soutenir l'hypothèse qu'une rotation mentale antihoraire ait pu opérer pendant notre tâche.

En résumé, les résultats de cette troisième étude indiquent qu'un biais spatial gauche-droite s'exprime chez l'enfant de 10 ans lorsque l'information sérielle est traitée dans un contexte numérique, comme le montrent les performances dans la tâche de comptage. En revanche, nos résultats suggèrent que la spatialisation d'une simple information ordinale n'est pas aisément détectable. Nous proposons que l'application d'une rotation mentale antihoraire au matériel est un facteur déterminant dans notre étude. Ainsi, la détection d'un biais spatial orienté de gauche à droite (latent) aurait pu être entravée par cette rotation antihoraire, laquelle découlerait d'habitudes motrices liées aux gestes de rotation effectués sur des objets physiques. Cette interprétation est étayée par nos résultats qui montrent une relation significative entre les réponses des participants et la manière dont ces derniers ont exécuté une rotation physique du matériel. Cependant, une limite majeure subsiste étant donné que la tâche de rotation intervenait *après* la tâche principale, il est également possible que les participants aient tout simplement orienté la série de boîtes en cohérence avec leur réponse, comme pour la justifier a posteriori. L'Expérience 4 a donc été menée dans le but d'investiguer plus directement l'impact de la rotation mentale sur l'expression d'un biais gauche-droite.

2.5 Expérience 4

2.5.1 Objectif

Le protocole expérimental proposé dans l'Expérience 4 visait à limiter la possibilité d'effectuer une rotation mentale au moment du test. Dans cette nouvelle étude, deux conditions expérimentales ont été comparées : une première condition pouvant induire

ayant effectué une rotation antihoraire apparaissent moins tranchées, avec une proportion non négligeable de réponses congruentes.

une rotation mentale du matériel, et une deuxième condition visant à limiter cette rotation mentale. Le matériel utilisé dans cette quatrième expérience a été adapté de l'étude de West et McCrink (2021) qui ont proposé à leurs participants une tâche de transposition spatiale en version numérique. Comme dans leur expérience, notre tâche proposait une animation consistant à recouvrir la série d'un occulteur (une planche en bois) pendant sa transposition d'un plan vertical à un plan horizontal[10].

La première condition appelée *Occulteur* était considérée comme *propice* à l'application d'une rotation mentale. Cette condition était considérée comme étant équivalente à celle des expériences précédentes, dans lesquelles les participants étaient invités à fermer les yeux pendant la transposition de l'axe. Dans les deux cas, les participants ne disposaient pas d'indices visuels leur permettant de comprendre la manière dont l'axe transitait d'une disposition à une autre lors de la phase de test, et étaient ainsi libres d'imaginer comment le matériel avait pu être tourné. Dans notre seconde condition, appelée condition *Translation*, l'occulteur était remplacé par une animation visuelle consistant à présenter un axe vertical et un axe horizontal de manière simultanée à l'écran. La transition entre les deux axes était mise en scène *via* le mouvement d'un protagoniste (ici une maman cochon à la recherche de son bébé) qui se déplaçait d'une disposition à une autre. Cette co-présence des deux axes avait pour but de *limiter* l'induction d'une rotation mentale.

Il était attendu que la condition Translation soit plus propice à l'expression d'un biais spatial gauche-droite, avec une asymétrie marquée en faveur des choix congruents. Comme dans l'Expérience 1, nous supposions que le biais spatial pourrait s'accentuer à mesure de l'acquisition d'une expertise en lecture et écriture. Par conséquent, il était attendu que le biais ne soit visible au plus tôt qu'aux alentours du CP. Concernant les adultes, un biais spatial marqué était attendu sous la condition Translation, mais aussi sous la condition Occulteur, dans la mesure où une spatialisation significative avait déjà été détectée dans notre première expérience.

2.5.2 Méthode

2.5.2.1 Participants

Cette étude a été approuvée par le comité d'éthique de l'Université Côte d'Azur (CERNI-Dossier n°2023-009). Un échantillon de 585 participants a pris part à cette expérience, répartis en huit groupes d'âge et assignés aléatoirement à l'une de nos deux conditions (condition Occulteur ou condition Translation). Trente-neuf enfants

[10] Nous utilisons à présent la terminologie verticale/horizontale plutôt que la terminologie sagittale/horizontale pour mieux correspondre à la nouvelle configuration spatiale de cette étude.

ont été exclus en raison de divers troubles du développement, conduisant à un total de 543 participants inclus dans les analyses statistiques. L'échantillon comprenait 311 participants féminins et 232 participants masculins ; 479 participants étaient droitiers, 53 étaient gauchers et 9 étaient ambidextres[11]. Le Tableau 2.7 indique la taille de l'échantillon et l'âge moyen pour chaque groupe et chaque condition expérimentale. Une analyse de puissance a été réalisée à l'aide du logiciel G*Power 3.1 (Faul et al., 2009). Cette analyse a indiqué qu'un échantillon de 20 participants par âge et par condition était nécessaire pour obtenir une puissance de .80 pour notre test binomial principal (contrastant les réponses congruentes des réponses inverses), en supposant une taille d'effet de 0.3. Comme cela a pu être le cas dans les études précédentes, certains échantillons excédaient l'effectif minimal requis, en raison d'un sur-recrutement.

Tableau 2.7 – Effectif et âge moyen pour chaque groupe et chaque condition de l'Expérience 4.

Groupe	Condition Occulteur			Condition Translation		
	N	Âge	(ET)	*N*	Âge	(ET)
MS	30	4.4	(0.3)	27	4.3	(0.4)
GS	41	5.3	(0.3)	37	5.4	(0.3)
CP	32	6.4	(0.4)	30	6.5	(0.3)
CE1	35	7.4	(0.3)	31	7.4	(0.3)
CE2	23	8.4	(0.3)	23	8.2	(0.2)
CM1	32	9.4	(0.6)	30	9.4	(0.4)
CM2	42	10.2	(0.4)	33	10.4	(0.3)
Adultes	53	33.0	(16.0)	44	31.0	(14.0)

2.5.2.2 Matériel

Deux vidéos ont été créées à partir du matériel utilisé dans l'étude de West et McCrink (2021). Le scénario décrivait une maman cochon à la recherche de son bébé. Ce dernier se cachait, et la mère sollicitait l'aide du participant pour le localiser. La maman et son petit mesuraient respectivement 3.2 cm×2.2 cm et 1.5 cm×1.5 cm. Les cachettes dans lesquelles le bébé pouvait être dissimulé consistaient en six cercles bleus équidistants de 2 cm de diamètre, positionnés sur un rectangle blanc mesurant 14.3 cm×2.9 cm, lui-même présenté sur un fond noir.

2.5.2.3 Procédure

Design général L'expérience s'est déroulée dans une pièce calme à l'abri de toute distraction. La tâche animée était diffusée sur un ordinateur placé à environ 50 cm des

[11] Cette information était manquante pour deux participants.

participants. Quelle que soit la condition (Occulteur ou Translation), la vidéo durait 3 minutes et 16 secondes. La tâche débutait par la présentation de consignes préliminaires. Pendant ces instructions, un avatar invitait les participants à rester concentrés tout le long de la vidéo. À l'issue de la tâche, ce même personnage les remerciait pour leur aide dans la recherche du bébé cochon. L'expérimentateur veillait quant à lui à ce que chaque participant ne détourne pas son attention de la tâche.

Essai d'introduction Les deux conditions commençaient par un essai d'introduction destiné à familiariser les participants avec la transposition d'un plan vertical à un plan horizontal. Dans cet essai, une seule cachette (un trou, matérialisé par un rond bleu) était localisée au centre d'un axe vertical, lui-même placé au centre de l'écran. Les participants voyaient alors apparaître une maman cochon, positionnée en bas de l'écran, dans l'alignement de l'axe vertical. Il était expliqué qu'elle était à la recherche de son petit : *« Voici maman cochon. Maman cochon est un peu triste car son bébé s'est caché et elle ne sait pas où il est. »*. Cette séquence durait environ 7 secondes, et après un délai de 2 secondes supplémentaires, le bébé cochon apparaissait dans la cachette visible à l'écran (voir la Figure 2.11 - Introduction). L'expression de la maman passait d'un visage triste à un visage heureux une fois son bébé retrouvé, ce qui était annoncé ainsi : *« Ah, bébé cochon est là ! »*.

L'essai d'introduction se poursuivait avec une scène illustrant la transposition de l'axe vertical à l'axe horizontal. Cette scène était présentée 4 secondes après l'apparition du bébé et variait en fonction de la condition expérimentale. Dans la condition Occulteur, un objet visuel animé (prenant la forme d'une planche en bois) descendait du haut de l'écran et venait recouvrir l'axe vertical pour l'occulter totalement. Cette animation était commentée ainsi : *« Oh regarde, on recouvre les cachettes et on les tourne ! »*. À la vue de l'occulteur, la maman cochon affichait un visage surpris. Par la suite, l'occulteur était levé pour révéler un axe identique au précédent, mais orienté horizontalement (voir la Figure 2.11a - Introduction). Cette séquence durait 7 secondes. Dans la condition Translation, le bébé cochon quittait la cachette localisée sur l'axe vertical et s'enfuyait vers le haut de l'écran. La maman cochon suivait alors son bébé, tandis qu'il était annoncé : *« Oh non, bébé cochon s'échappe et va se cacher plus loin. Vite, vite, maman cochon court pour aller le chercher. »*. Tandis qu'elle dépassait l'axe vertical, un axe identique, mais disposé à l'horizontale apparaissait progressivement à l'écran, permettant la présentation simultanée des deux configurations (voir la Figure 2.11b). Cette séquence durait 11 secondes.

Que ce soit pour la condition Occulteur ou la condition Translation, le bébé cochon se trouvait toujours dans la cachette centrale une fois l'axe horizontal révélé, ce qui était également annoncé au participant (*« Bébé cochon est toujours là. »*). L'objectif de

cette séquence était de montrer au participant que la transposition vertico-horizontale n'affectait pas la cachette du bébé. Une fois le bébé apparu à l'écran, il restait visible pendant une durée de 3 secondes avant que l'essai ne s'achève.

Phase d'entraînement La tâche se poursuivait avec une phase d'entraînement composée de quatre essais, lors desquels un axe vertical comportant six cachettes était présenté au centre de l'écran. Le bébé cochon se cachait toujours dans le même emplacement, la deuxième boîte ou la cinquième boîte partant du bas de l'axe, cette position étant contrebalancée entre les participants.

Lors du premier essai, la cachette du bébé cochon était marquée d'une étoile rose (voir la Figure 2.11 - Essai 1). La maman cochon affichait un air triste et il était déclaré : *« Bébé cochon s'est encore caché dans l'une de ces cachettes. »* (pour une durée de 5 secondes). Toutes les cachettes étaient ensuite inspectées une par une, en commençant par le bas de l'axe, pour déterminer si le bébé cochon se trouvait à l'intérieur ou non. Pour les boîtes dans lesquelles le bébé n'était pas caché, il était déclaré : *« Il n'est pas dans cette cachette. »*, pour une durée de 2.5 secondes. Lors de l'inspection de la boîte où le bébé cochon était dissimulé, le bébé apparaissait au centre de la cachette : *« Regarde, il est dans cette cachette ! Tu vois, il y a même une étoile pour te dire où il se cache. »* (pour une durée de 6 secondes). La mère affichait un visage heureux dès qu'elle retrouvait son petit. La durée globale de ce premier essai était de 24 secondes.

Dans les deuxième et troisième essais, l'emplacement du bébé cochon n'était plus identifié par une étoile rose (voir la Figure 2.11 - Essais 2 et 3). De nouveau, la maman cochon affichait un visage triste et il était indiqué : *« Bébé cochon joue encore à cache-cache, sa maman le cherche. »* (Essai 2) ou *« Tu penses que bébé cochon se cache encore ? Mais oui ! Aidons maman cochon à le retrouver ! »* (Essai 3). Cette séquence d'introduction durait 5 secondes. Ensuite, les cachettes étaient inspectées une par une pendant 2.5 secondes, en commençant par le bas de l'axe et en indiquant si le bébé cochon se cachait à l'intérieur (*« Regarde, il est dans cette cachette ! »*) ou non (*« Il n'est pas dans cette cachette. »*). Les Essais 2 et 3 duraient 20 secondes chacun.

Le dernier essai de la phase d'entraînement différait légèrement des précédents. La séquence débutait par une phrase introductive (*« Décidément, bébé cochon est un sacré farceur. Cherchons-le avec maman cochon. »*). Cependant, au lieu d'inspecter les cachettes les unes après les autres pour trouver le bébé, les participants étaient invités à identifier eux-mêmes son emplacement. Dans la condition Occulteur, les cachettes étaient tout d'abord masquées à l'aide de la même planche en bois que celle présentée dans l'introduction. Une fois cette planche levée, les mêmes cachettes étaient visibles à l'écran, toujours orientées verticalement (voir la Figure 2.11a - Essai 4). Cette animation était accompagnée d'un commentaire : *« Oh regarde, on recouvre les cachettes...*

Ah, nous les voyons de nouveau. ». Il était ensuite demandé aux participants de pointer du doigt l'emplacement dans lequel ils pensaient que le bébé cochon se cachait (*« À ton avis, où se cache bébé cochon ? Montre-nous avec ton doigt ! »*). Après cette séquence d'instruction (d'une durée totale de 15 secondes), les participants disposaient de 8 secondes pour indiquer leur réponse. La boîte sélectionnée et la main utilisée pour répondre étaient enregistrées par l'expérimentateur. Après ce délai de réponse, le bébé cochon apparaissait dans la même cachette que dans les trois premiers essais. Le bébé demeurait visible pendant 4 secondes. La procédure était différente dans la condition Translation, car il était directement demandé aux participants d'indiquer l'emplacement dans lequel ils pensaient que le bébé cochon se cachait (voir la Figure 2.11b - Essai 4). Par conséquent, la phase d'instruction ne durait que 10 secondes.

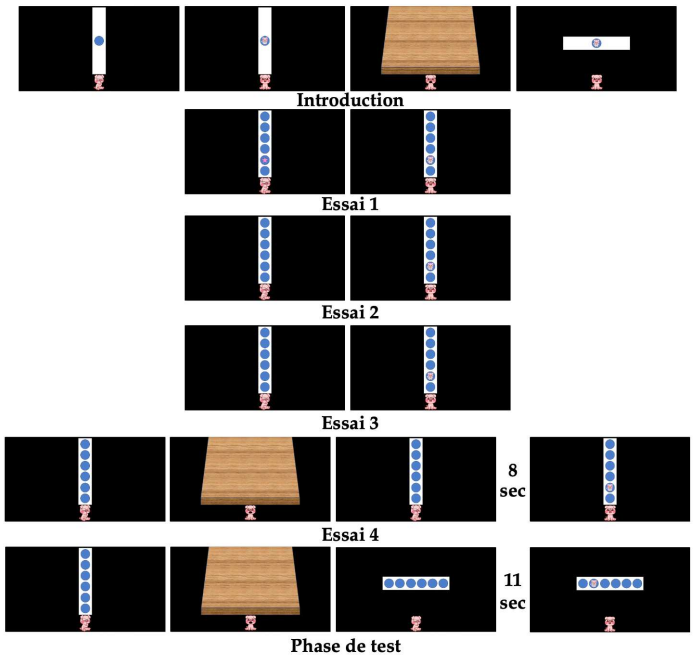
Phase de test Le tout dernier essai était destiné à mesurer le biais spatial. L'essai débutait avec une transposition de l'axe d'une disposition verticale vers une disposition horizontale (voir la Figure 2.11a et 2.11b - Phase de test). Cette séquence durait 12 secondes dans les deux conditions, l'animation étant commentée différemment selon qu'il s'agissait de la condition Occulteur (*« Pauvre maman cochon, bébé joue encore à cache-cache. Et regarde, on recouvre encore les cachettes et on les tourne ! »*) ou Translation (*« Oh non, bébé s'échappe encore pour aller se cacher plus loin. Vite, vite, maman cochon court pour aller le chercher. »*). Après la transposition, le participant était invité à indiquer l'emplacement du bébé cochon parmi les six cachettes, disposées cette fois-ci sur un axe horizontal (*« Maman cochon ne sait pas où est son bébé, est-ce que tu sais où il est ? Montre-nous avec ton doigt. »*, cette instruction ayant duré 6 secondes). Un délai de 11 secondes était accordé au participant pour répondre, la boîte sélectionnée et la main pour répondre étant de nouveau enregistrées par l'expérimentateur. Passé ce délai, le bébé apparaissait dans la deuxième ou la cinquième cachette en partant de la gauche de l'axe horizontal, et demeurait à l'écran pendant 4.5 secondes. Ce dernier essai durait 33.5 secondes au total.

2.5.3 Résultats

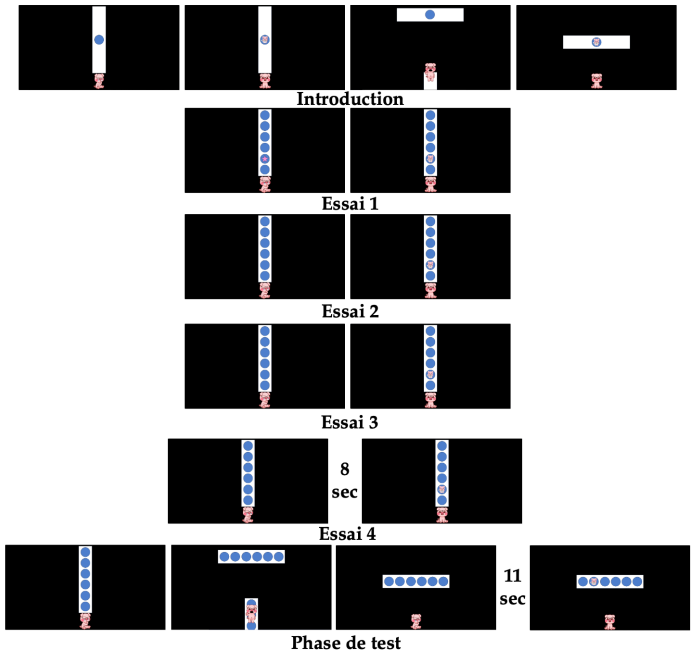
Les réponses ont été codées « Congruentes », « Inverses » ou « Incongruentes », comme pour les expériences précédentes.

2.5.3.1 Comparaison entre conditions

Les réponses des participants ont tout d'abord été comparées entre les conditions Occulteur et Translation. Un χ^2 d'indépendance réalisé sur l'ensemble des participants



(A) Séquences animées utilisées dans la condition Occulteur de l'Expérience 4 avec apparition du bébé cochon dans la Boîte n°2. *Note.* La même procédure a été utilisée pour la Boîte n°5, à la différence que le bébé était caché dans la cinquième boîte en partant du bas/de la gauche de l'axe. Sur cette image, le temps s'écoule de gauche à droite et de haut en bas.



(B) Séquences animées utilisées dans la condition Translation de l'Expérience 4 avec apparition du bébé cochon dans la Boîte n°2. *Note.* La même procédure a été utilisée pour la Boîte n°5, à la différence que le bébé était caché dans la cinquième boîte en partant du bas/de la gauche de l'axe. Sur cette image, le temps s'écoule de gauche à droite et de haut en bas.

FIGURE 2.11 – Séquences animées utilisées dans l'Expérience 4

a indiqué une différence significative dans la distribution des réponses congruentes, inverses et incongruentes entre les deux conditions ($\chi^2(2) = 25.33$, $p < .001$, V de Cramer $= 0.22$). Comparé à la condition Occulteur, les participants placés dans la condition Translation ont produit davantage de réponses congruentes (63% *vs.* 53%) et moins de réponses inverses (20% *vs.* 39%). De manière plus surprenante, la proportion de réponses incongruentes tendait également à être plus élevée dans la condition Translation (17%) en comparaison à la condition Occulteur (09%). Cependant, en examinant les erreurs compatibles avec un traitement gauche-droite (i.e., choisir la Boîte n°1 ou la Boîte n°3 lors d'un test pour la Boîte n°2, et inversement, choisir la Boîte n°4 ou la Boîte n°6 lors d'un test pour la Boîte n°5), les résultats ont indiqué que ce type d'erreur était plus fréquemment retrouvé dans la condition Translation que dans la condition Occulteur (respectivement 63% et 36%). Un test binomial basé sur $\pi = \frac{1}{2}$ a ensuite été appliqué pour déterminer si la proportion d'erreurs compatibles avec un traitement gauche-droite était supérieure à la proportion d'erreurs compatibles avec un traitement droite-gauche dans la condition Translation. Les résultats ont montré que ces proportions ne s'écartaient que marginalement de celles attendues sous l'hypothèse du hasard ($p = .063$, h de Cohen $= .18$). La même analyse a été conduite dans la condition Occulteur, dans laquelle les participants tendaient à davantage commettre des erreurs compatibles avec un traitement droite-gauche. Toutefois, cette tendance ne s'est pas révélée statistiquement significative ($p = .115$, h de Cohen $= 0.2$).

Une analyse log-linéaire a ensuite été conduite pour évaluer si la distribution entre les réponses congruentes, inverses et incongruentes variait non seulement en fonction de la condition, mais également en fonction du groupe d'âge (voir le Tableau 2.8 et la Figure 2.12 pour un aperçu des distributions obtenues dans chaque modalité). Cette analyse a pu mettre en évidence un effet significatif de la condition ($L(2) = 26.49$, $p < .001$) et du groupe d'âge ($L(14) = 41.19$, $p < .001$) sur les réponses des participants. En revanche, aucune interaction entre ces deux facteurs n'a pu être identifiée ($L(14) = 8.03$, $p = .888$, voir le Tableau B.3 dans l'Annexe B pour le détail de cette analyse).

Condition Occulteur La présence d'un biais spatial gauche-droite a ensuite été évaluée pour chaque condition séparément. Dans la condition Occulteur, les χ^2 d'ajustement ont indiqué que la distribution des choix congruents, inverses et incongruents différait significativement d'une distribution aléatoire du CP à l'âge adulte (tous les $\chi^2 \geq 8.7$, tous les $p \leq .013$ et tous les W de Cohen ≥ 0.6). Il est cependant à noter qu'après une correction de Bonferonni (i.e., en utilisant un seuil critique de $p = \frac{0.05}{8} = .006$), les résultats des enfants de CE2 n'étaient plus significatifs ($p = .013$ pour les enfants de CE2, tous les autres $p \leq .002$). Les résultats des enfants de MS et GS n'ont par ailleurs pas atteint le seuil de significativité, que ce soit en considérant le seuil p corrigé ou le seuil classique $p = .05$ ($\chi^2(2) = 2.6$, $p = .273$, W de Cohen $= 0.29$

Tableau 2.8 – Distribution des réponses pour chaque groupe d'âge dans la condition Occulteur et dans la condition Translation de l'Expérience 4

Groupe	N	Congruente	Incongruente	Inverse	Congruente + Inverse	p-valeur Congruente *vs.* Inverse
			Condition Occulteur			
MS	30	14 (47%)*	7 (23%)	9 (30%)	23 (77%)*	$p = .202$, $h = 0.15$
GS	41	19 (46%)*	10 (24%)	12 (29%)	31 (76%)*	$p = .141$, $h = 0.16$
CP	32	13 (41%)*	1 (3%)	18 (56%)	31 (97%)*	$p = .237$, $h = 0.11$
CE1	35	20 (57%)*	3 (9%)	12 (34%)	32 (91%)*	$p = .108$, $h = 0.18$
CE2	23	11 (48%)*	1 (4%)	11 (48%)	22 (96%)*	$p = .584$, $h = 0.00$
CM1	32	21 (66%)*	1 (3%)	10 (31%)	31 (97%)*	$p = .035$, $h = 0.26$
CM2	42	23 (55%)*	1 (2%)	18 (43%)	41 (98%)*	$p = .266$, $h = 0.09$
Adultes	53	31 (58%)*	1 (2%)	21 (40%)	52 (98%)*	$p = .106$, $h = 0.14$
			Condition Translation			
MS	27	15 (56%)*	8 (30%)	4 (15%)	19 (70%)*	$p = .01$, $h = 0.44$
GS	37	18 (49%)*	11 (30%)	8 (22%)	26 (70%)*	$p = .038$, $h = 0.28$
CP	30	17 (57%)*	4 (13%)	9 (30%)	26 (87%)*	$p = .084$, $h = 0.22$
CE1	31	23 (74%)*	3 (10%)	5 (16%)	28 (90%)*	$p < .001$, $h = 0.49$
CE2	23	16 (70%)*	3 (13%)	4 (17%)	20 (87%)*	$p = .0059$, $h = 0.46$
CM1	30	20 (67%)*	6 (20%)	4 (13%)	24 (80%)*	$p < .001$, $h = 0.52$
CM2	33	19 (58%)*	5 (15%)	9 (27%)	28 (85%)*	$p = .044$, $h = 0.26$
Adultes	44	33 (75%)*	3 (7%)	8 (18%)	41 (93%)*	$p < .001$, $h = 0.46$

Note. Le test binomial comparant les réponses congruentes à l'ensemble des autres réponses est basé sur une probabilité théorique $\pi = \frac{1}{6}$. Une probabilité $\pi = \frac{2}{6}$ a été utilisée pour estimer si les réponses correctes non-directionnelles ont été réalisées au-delà du hasard. Les valeurs suivies d'une $*$ sont celles ayant atteint le seuil de significativité pour l'un ou l'autre de ces tests. Le test opposant la proportion de réponses congruentes à la proportion de réponses inverses est basé sur une probabilité $\pi = \frac{1}{2}$. Le seuil de la p-valeur a été fixé à $\frac{.05}{8} = .006$ après une correction de Bonferroni. La valeur h correspond à la taille de l'effet évaluée par un h de Cohen.

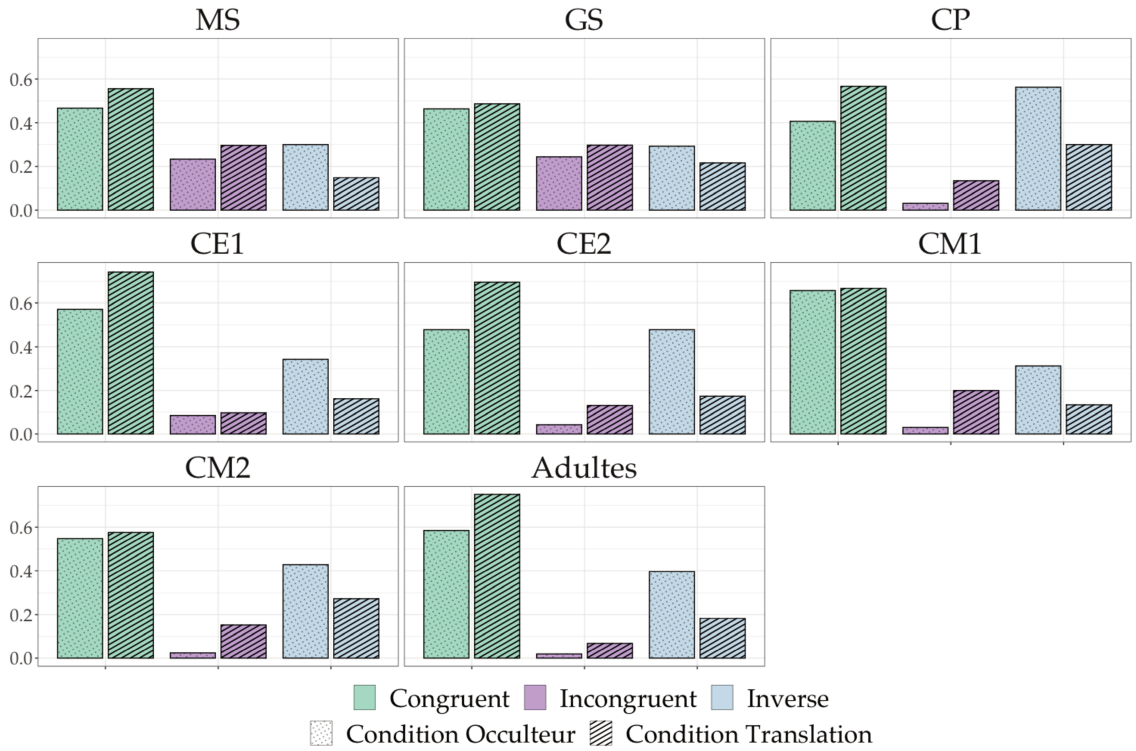


FIGURE 2.12 – Distribution des réponses obtenues dans la condition Occulteur et dans la condition Translation pour chaque groupe d'âge de l'Expérience 4

pour les enfants en MS et $\chi^2(2) = 3.27$, $p = .195$, W de Cohen $= 0.28$ pour les enfants en GS).

Des tests binomiaux ont ensuite été effectués pour évaluer si les réponses correctes non directionnelles (i.e., les réponses congruentes et inverses) avaient été sélectionnées au-delà du hasard. Cette analyse a mis en évidence un bon niveau de compréhension de la tâche pour l'ensemble des groupes d'âge (tous les $p \leq .001$, tous les h de Cohen ≥ 0.63). De plus, les résultats ont indiqué que la boîte congruente avait également été choisie significativement plus que le hasard dans chaque groupe d'âge (tous les $p \leq .001$, tous les h de Cohen ≥ 0.38). Par la suite, une autre série de tests binomiaux a été réalisée pour contraster les choix congruents des choix inverses dans chaque échantillon. Après correction de Bonferroni, aucune préférence significative pour la boîte congruente n'a pu être constatée, et ce quel que soit le groupe d'âge considéré. Ces résultats sont présentés dans le Tableau 2.8. En définitive, la condition Occulteur n'a pas permis de mettre en évidence une tendance à traiter l'information sérielle de la gauche vers la droite, que ce soit chez l'enfant ou chez l'adulte[12].

Par ailleurs, une analyse développementale a été menée *via* un χ^2 d'indépendance

[12] La même analyse menée uniquement sur les enfants M_+ (i.e., les enfants ayant sélectionné une boîte congruente lors du dernier essai vertical) n'a pas altéré le pattern de résultats (voir le Tableau B.4 dans l'Annexe B).

pour comparer les réponses des participants en fonction du groupe d'âge. Ce test a indiqué une différence significative dans la distribution des réponses congruentes, inverses et incongruentes en fonction de l'âge des participants ($\chi^2(14) = 35$, $p = .001$, V de Cramer $= 0.25$). Le résultat demeurait significatif lorsque seuls les enfants étaient considérés dans l'analyse ($\chi^2(12) = 27.8$, $p = .006$, V de Cramer $= 0.24$). Globalement, les participants ont produit de moins en moins de réponses incongruentes à mesure que l'âge augmentait, tandis que la distribution des réponses congruentes et inverses est restée relativement stable. Afin de mieux rendre compte de la variation des réponses caractéristiques d'un biais spatial gauche-droite en fonction de l'âge, une régression logistique a été modélisée sur les réponses congruentes (codées 1, contre 0 pour les autres réponses). Aucune relation significative entre les deux variables n'a été observée, ni dans l'échantillon global ($z = 1.55$, $p = .122$, $\beta Std. = 0.20$), ni en limitant l'analyse aux groupes d'enfants ($z = 1.52$, $p = .129$, $\beta Std. = 0.20$).

Condition Translation Les mêmes analyses ont ensuite été appliquées à la condition Translation. Les χ^2 d'ajustement effectués sur les distributions de réponses congruentes, inverses et incongruentes ont atteint le seuil de significativité dans tous les groupes, excepté pour les enfants de GS (tous les $\chi^2 \geq 6.89$, tous les $p \leq .032$ et tous les W de Cohen ≥ 0.51 contre $\chi^2(2) = 4.27$, $p = .118$, W de Cohen $= 0.34$ pour les enfants en GS). Cependant, après application d'une correction de Bonferroni ($p = \frac{0.05}{8} = .006$), les résultats obtenus pour les enfants en MS, en CP et en CM2 n'étaient plus significatifs. Par la suite, des tests binomiaux ont révélé que les réponses correctes non directionnelles avaient été réalisées au-delà du hasard pour l'ensemble des groupes d'âge (tous les $p \leq .001$, tous les h de Cohen ≥ 0.53). Il en était de même en considérant uniquement les choix congruents (tous les $p \leq .001$, tous les h de Cohen ≥ 0.5).

De la même manière que dans la condition Occulteur, des tests binomiaux supplémentaires ont été conduits pour attester d'une préférence en faveur de la boîte congruente, en comparaison avec la boîte inverse. Pour ces tests binomiaux, seuls les résultats des enfants de CP n'ont pas atteint la significativité au seuil classique de $p = .05$. Toutefois, après application d'une correction de Bonferroni, il s'est avéré que ni les enfants de MS, GS ou de CM2 ne pouvaient être considérés comme manifestant un biais spatial fiable, leur résultat n'étant pas inférieur au seuil critique $p = .006$. Les résultats de tous les tests binomiaux sont rapportés dans le Tableau 2.8. En définitive, un biais spatial orienté de gauche à droite a pu être observé chez les enfants de CE1, CE2, CM1 ainsi que chez l'adulte[13].

[13] La même analyse a également été menée uniquement en considérant les enfants M_+, ce qui a modifié les résultats pour les enfants de CE2 (voir le Tableau B.4 dans l'Annexe B). Pour ce groupe, le

L'analyse développementale conduite sur les distributions de réponses congruentes, inverses et incongruentes n'a pas révélé de différence significative entre les sept groupes d'enfants ($\chi^2(12) = 12.7$, $p = .39$, V de Cramer $= 0.17$). Cette absence de significativité a persisté en considérant également les réponses des adultes dans l'analyse ($\chi^2(14) = 17.94$, $p = .21$, V de Cramer $= 0.19$). Les données suggèrent donc que la répartition des réponses congruentes, inverses et incongruentes obtenues dans la condition Translation est constante à travers l'ensemble des groupes d'âge. Pour mieux rendre compte de l'évolution du biais spatial, la relation entre les réponses congruentes (1 *vs.* 0) et l'âge des participants a été testée par le biais d'une régression logistique. Ce test n'a révélé aucune relation significative que ce soit sur l'échantillon global ($z = 1.51$, $p = .13$, $\beta Std. = 0.23$) ou lorsque seuls les groupes d'enfants étaient considérés ($z = 0.95$, $p = .343$, $\beta Std. = 0.13$).

2.5.3.2 Comparaison avec les expériences précédentes

Une analyse finale a été réalisée pour comparer les résultats de l'Expérience 4 avec ceux des expérimentations précédentes, tout en tenant compte de l'âge des participants. Quatre analyses log-linéaires distinctes ont ainsi été réalisées, chacune visant à comparer la distribution des types de réponses observées dans l'une des deux conditions de l'Expérience 4 à celles recueillies dans les Expériences 1 et 2, selon les groupes d'âge[14]. Seul un test de χ^2 a été réalisé pour la comparaison avec l'Expérience 3, étant donné que cette expérience ne comportait qu'un seul groupe d'âge.

Dans un premier temps, deux analyses log-linéaires ont permis de contraster les résultats entre l'Expérience 1 et chacune des conditions de l'Expérience 4 (voir la Figure 2.13). Ces analyses ont montré que la distribution des réponses congruentes, inverses et incongruentes différait significativement entre l'Expérience 1 et l'Expérience 4 à la fois pour la condition Occulteur ($L(2) = 12.66$, $p = .002$) et la condition Translation ($L(2) = 19.40$, $p < .001$). Comparé à l'Expérience 1, la tâche de translation a généré une plus forte proportion de réponses congruentes (42% dans l'Expérience 1 contre 63% dans la condition Translation), ainsi que des proportions plus faibles de réponses inverses (35% dans l'Expérience 1 contre 20% dans la condition Translation) et incongruentes (23% dans l'Expérience 1 contre 17% dans la condition Translation). De manière similaire, les résultats ont indiqué une plus grande proportion de réponses congruentes dans la condition Occulteur comparé à l'Expérience 1 (42% dans l'Expérience 1 contre 53% dans la condition Occulteur), de même qu'une diminution des

test binomial contrastant les choix congruents des choix inverses n'était plus significatif après correction de Bonferroni ($p = .009$).

[14] Pour la comparaison avec l'Expérience 1, les données des enfants de MS et GS de la quatrième expérience ont été agrégées, afin de correspondre aux données de la première étude. Il en a été de même pour les enfants en CM1 et en CM2.

réponses incongruentes d'un protocole à l'autre (23% dans l'Expérience 1 contre 9% dans la condition Occulteur). En revanche, des proportions comparables de réponses inverses ont été retrouvées entre ces deux tâches (35% dans l'Expérience 1 contre 38% dans la condition Occulteur).

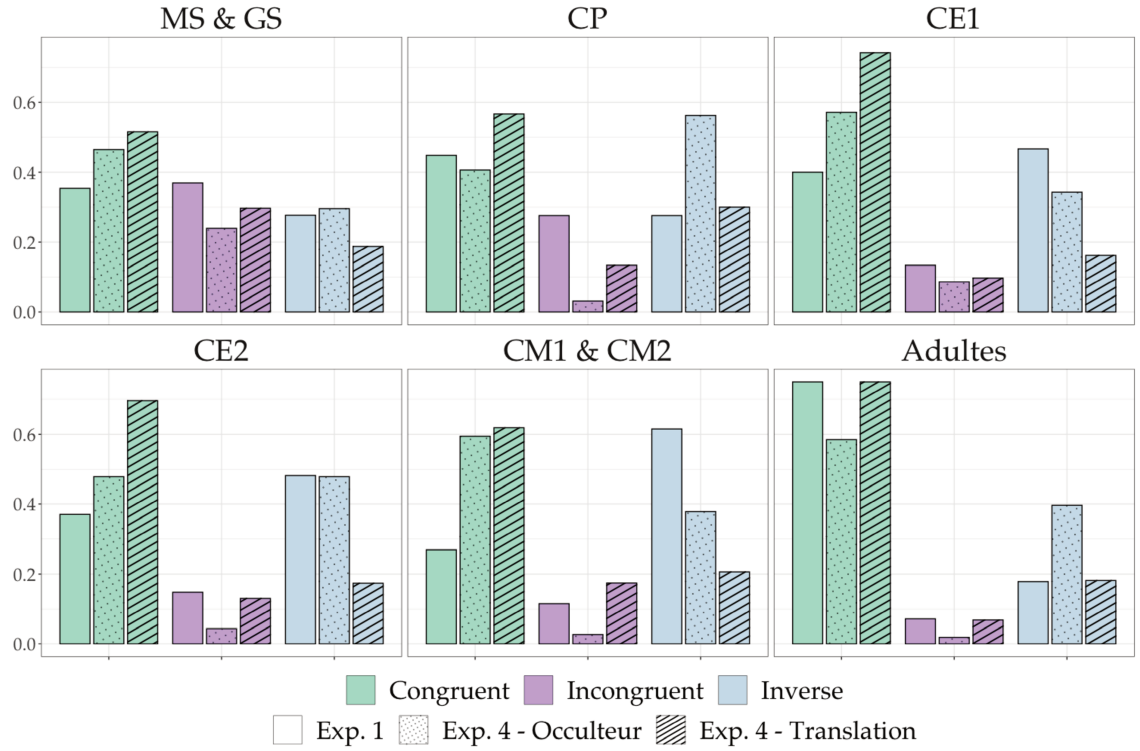


Figure 2.13 – Comparaison des distributions de réponses par groupe d'âge entre l'Expérience 1 et chaque condition de l'Expérience 4

Ces deux analyses log-linéaires ont également montré une différence significative dans la distribution des réponses entre les groupes d'âge, que ce soit dans la comparaison entre l'Expérience 1 et la condition Occulteur ($L(10) = 44.06$, $p < .001$) ou entre l'Expérience 1 et la condition Translation ($L(10) = 34.80$, $p < .001$). Dans les deux conditions, les participants tendaient à produire moins de réponses incongruentes et davantage de réponses congruentes à mesure que l'âge augmentait. Aucun effet d'interaction significatif entre l'expérience et le groupe d'âge n'a pu être mis en évidence ($L(10) = 17.80$, $p = .058$ pour la condition Occulteur et $L(10) = 11.69$, $p = .306$ pour la condition Translation, voir le Tableau B.5 dans l'Annexe B pour les détails de ces deux analyses).

Dans un second temps, les résultats de l'Expérience 2 ont été comparés à ceux de la condition Occulteur et ceux de la condition Translation de l'Expérience 4 (voir la Figure 2.14). Aucune différence significative n'a pu être mise en évidence entre les réponses obtenues pour l'Expérience 2 et celles obtenues pour la condition Occulteur ($L(2) = 0.06$, $p = .971$) ou pour la condition Translation ($L(2) = 2.18$, $p = .336$). Un

effet significatif du groupe d'âge a pu être mis en évidence dans l'analyse regroupant les données de l'Expérience 2 et de la condition Occulteur ($L(2) = 21.49$, $p < .001$). Indépendamment de la tâche, les résultats indiquent chez les enfants les plus âgés une hausse des réponses congruentes (de 43% en GS à 58% en CM2) et des réponses inverses (de 31% en GS à 41% en CM2), associée à une forte diminution des réponses incongruentes (de 26% en GS à 1% en CM2). Un effet similaire a pu être identifié pour l'analyse relative à l'Expérience 2 et la condition Translation. Par rapport aux enfants les plus jeunes, les enfants les plus âgés ont produit davantage de réponses congruentes (60% en CM2 contre 44% en GS) et de réponses inverses (32% en CM2 contre 26% en GS), tout en produisant nettement moins de réponses incongruentes (8% en CM2 contre 29% en GS). Par ailleurs, l'interaction entre l'expérience et l'âge n'a pas atteint le seuil de significativité dans la condition Occulteur ($L(2) = 1.70$, $p = .428$), bien qu'un effet marginal ait été identifié dans la condition Translation ($L(2) = 5.42$, $p = .067$). Les résultats détaillés de ces deux analyses log-linéaires sont présentés dans le Tableau B.6 en Annexe B.

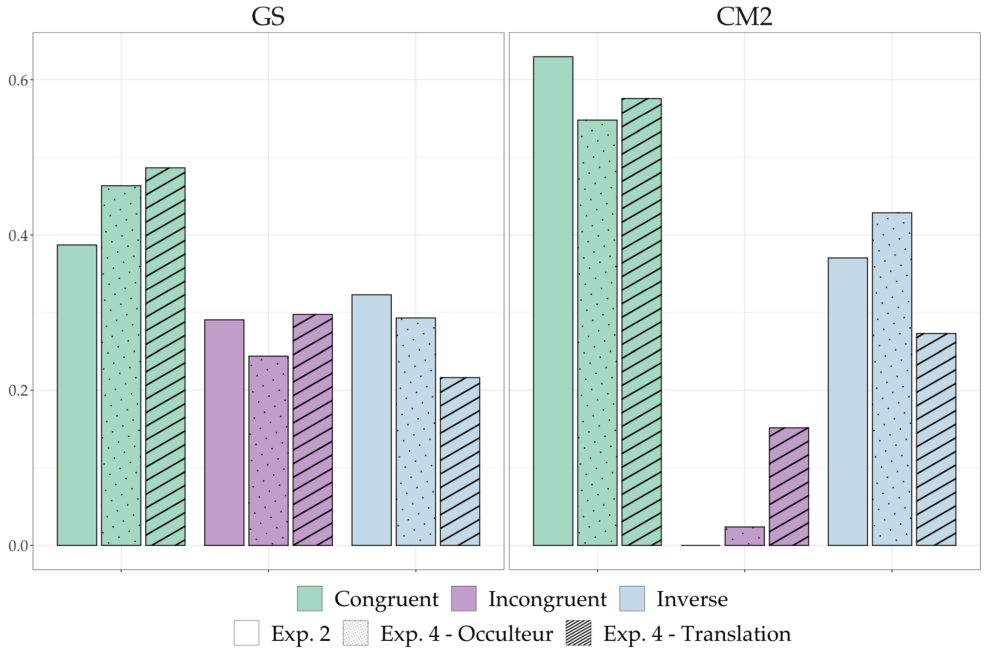


Figure 2.14 – Comparaison des distributions de réponses par groupe d'âge entre l'Expérience 2 et chaque condition de l'Expérience 4

Pour terminer, aucune différence dans la distribution des réponses entre l'Expérience 3 et l'une ou l'autre des conditions de l'Expérience 4 n'a pu être observée ($\chi^2(2) = 0.46$, $p = .795$, V de Cramer $= 0.08$ dans la condition Occulteur et $\chi^2(2) = 5.08$, $p = .079$, V de Cramer $= 0.28$ dans la condition Translation, voir la Figure 2.15).

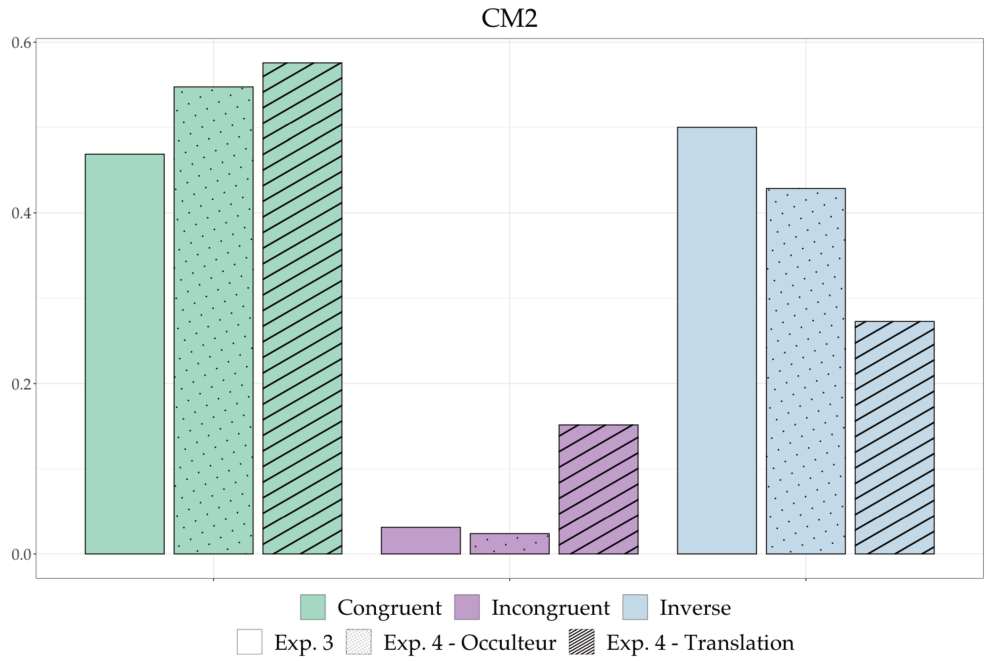


FIGURE 2.15 – Comparaison des distributions entre l'Expérience 3 et chaque condition de l'Expérience 4. *Note.* Le graphique se concentre sur les données des élèves de CM2 pour l'Expérience 4 afin de permettre une comparaison avec l'Expérience 3 qui n'inclut que ce groupe d'âge.

2.5.4 Discussion

L'objectif de cette quatrième étude était d'évaluer dans quelle mesure une rotation mentale du matériel présenté dans une tâche de transposition spatiale pouvait interférer avec la mesure d'un biais spatial orienté de gauche à droite. Pour ce faire, nous avons comparé une tâche susceptible d'induire une rotation mentale (condition Occulteur), à une tâche censée limiter cette rotation (condition Translation). Nous nous attendions à détecter un biais spatial significatif à partir du CP dans la tâche limitant la rotation, tandis que – conformément aux résultats des trois premières études – aucun effet n'était attendu dans la condition induisant une rotation. Les résultats de cette quatrième étude tendent à corroborer nos prédictions, étant donné qu'un biais spatial a pu être détecté dans la condition limitant la rotation, alors qu'il n'était pas identifiable dans la condition alternative. Il est donc plausible que l'absence de résultats significatifs dans nos expériences précédentes soit imputable, au moins en partie, à la rotation mentale.

Au-delà d'occasionner une augmentation des réponses congruentes (caractéristiques d'un biais gauche-droite), la condition limitant la rotation mentale a par ailleurs généré davantage de réponses incongruentes chez nos participants. Une interprétation plausible au regard de ce résultat réside dans la présentation simultanée de deux axes à l'écran. Bien que cette configuration ait été déterminante pour limiter le recours à une

rotation mentale durant la tâche, elle a néanmoins pu générer davantage d'incertitude chez les participants. Du fait que les axes vertical et horizontal correspondaient à deux objets distincts, cette configuration a pu inciter certains participants à considérer que l'élément cible pouvait être localisé dans un nouvel emplacement, les amenant à sélectionner une boîte incongruente au moment du test. Ce résultat, bien qu'inattendu, demeure par ailleurs intéressant dans l'évaluation de l'efficacité de notre nouveau protocole. En effet, il a été observé que ces réponses incongruentes tendaient à se rapporter plus fréquemment à la partie gauche de l'axe qu'à la partie droite. Bien que marginalement significative, une telle préférence n'a pas été retrouvée dans la condition Occulteur (63% d'erreurs gauche-droite dans la condition Translation contre seulement 36% dans la condition Occulteur). Par conséquent, l'utilisation d'une tâche limitant la rotation mentale semble favoriser l'augmentation de réponses orientées vers la gauche, qu'il s'agisse des réponses congruentes attendues – majoritaires dans cette étude – ou non.

Au regard de la littérature, l'Expérience 4 permet de nuancer les résultats obtenus par West et McCrink (2021). Ces auteurs n'ont pas pu observer de biais spatial gauche-droite chez l'adulte *via* un protocole utilisant un occulteur. Dans notre quatrième étude, l'utilisation d'un occulteur a conduit au même résultat (i.e., aucun biais spatial n'a pu être mis en évidence chez l'adulte). Cependant, il convient de rappeler qu'un biais spatial était présent pour cette population dans l'Expérience 1, alors que le fait de ne plus avoir accès visuellement à l'axe en fermant les yeux dans la première expérience pouvait s'apparenter à l'occlusion proposée dans l'Expérience 4. Il semble donc que deux tâches susceptibles d'induire une rotation mentale (à savoir l'Expérience 1 et la condition Occulteur de l'Expérience 4) puissent aboutir à des résultats divergents quant à la manifestation du biais gauche-droite chez une population adulte. Néanmoins, cette contradiction pourrait trouver une explication simple : là où l'expérimentateur effectuait subrepticement la rotation de l'axe dans l'Expérience 1, la transposition dans la condition Occulteur était accompagnée d'un commentaire oral (à la manière de West et McCrink, 2021, les participants étaient informés que les boîtes étaient recouvertes et qu'elles allaient être *tournées*). À l'inverse, les participants de l'Expérience 1 devaient déduire cette transformation spatiale à la vue du nouvel agencement. Ainsi, au lieu de simplement induire une rotation mentale comme nous l'avions initialement suggéré, la condition Occulteur de l'Expérience 4 a pu explicitement *encourager* le recours à ce mécanisme. Dans ces conditions, le mécanisme de rotation mentale opéré préférentiellement dans le sens antihoraire a probablement suffi à masquer un biais gauche-droite pourtant bien ancré dans cette population.

Concernant le développement du biais chez l'enfant, notre dernière étude a également permis d'affiner et de compléter les résultats de West et McCrink (2021). Pour

rappel, les auteurs avaient identifié une préférence gauche-droite significative chez l'enfant de quatre ans (correspondant à notre groupe de MS). Dans cette quatrième étude, un effet a également été constaté dans ce groupe d'âge, bien que la p-valeur soit uniquement inférieure au seuil de significativité conventionnel, et non au seuil corrigé égal à $p = .006$ [15] (ce qui est également le cas dans l'étude de West et McCrink si nous appliquons une correction de Bonferroni à leurs résultats). Alors que West et McCrink (2021) n'avaient pas été en mesure d'observer un biais chez l'enfant de 5 ans (correspondant à notre groupe de GS), les données de l'Expérience 4 suggèrent que cet effet est présent à cet âge. Ces résultats contredisent notre hypothèse d'une expertise en lecture/écriture à l'origine de la réémergence du biais aux alentours du CP et un renforcement de la préférence gauche-droite au fil de l'âge. La constatation d'un effet non négligeable chez les plus jeunes enfants de cette étude suggère ici que la réémergence d'un biais de nature culturelle pourrait être conditionnée par des expériences directionnelles plus précoces qui ne sont pas nécessairement directement liées aux activités de lecture-écriture. Parmi ces expériences culturelles figurent, par exemple, les gestes employés par l'entourage pour compter ou organiser des informations et des objets de gauche à droite (McCrink et al., 2018 ; Troadec & Zarhbouch, 2011) ou pour pointer le texte d'un livre lors d'une lecture partagée (Göbel et al., 2018), des gestes auxquels les enfants sont exposés dès leur plus jeune âge (pour une revue de ces différentes activités culturelles, voir Bulut et al., 2025).

Au-delà d'une occurrence plus précoce du biais spatial, nos résultats montrent également une fluctuation de l'effet chez les enfants de l'école élémentaire. Ce constat est particulièrement illustré par les données des enfants de CP (âgés de six ans en moyenne), pour lesquels seul un effet marginal a été détecté ($p = .08$), alors même que cet âge était pressenti comme un moment charnière dans l'apparition du biais spatial. Il s'avère difficile d'éclairer ce résultat au regard de nos études de référence, cette tranche d'âge n'ayant jamais été soumise à un protocole de transposition spatiale à

[15] Il est à noter qu'une analyse supplémentaire a été conduite sur les p-valeurs issues de la condition Translation, dans le but d'aller au-delà de l'approche de correction classique de Bonferroni, trop conservatrice. Cette analyse s'appuie sur la méthode de Benjamini et Hochberg (1995), qui vise à contrôler le *False Discovery Rate (FDR)*, soit le taux attendu de faux positifs parmi une famille de tests. Dans cette méthode, les p-valeurs issues d'une même famille sont tout d'abord classées par ordre croissant. Pour chaque rang i, une valeur critique est calculée isolément selon la formule : $(i/m) * \alpha$; où m correspond au nombre total de tests réalisés et *alpha* au niveau de FDR retenu pour la correction (ici, .05). Le plus grand rang i tel que $p_{(i)} \leq (i/m) * \alpha$ est alors identifié, et toute les p-valeurs de rang inférieur ou égal à i sont considérées comme statistiquement significatives (voir Benjamini & Hochberg, 1995). En comparaison avec la méthode de Bonferroni, qui applique le même seuil (α/m) à tous les tests, la méthode de Benjamini-Hochberg est moins conservatrice. Elle n'utilise ce seuil strict que pour la plus petite valeur p, tandis que des seuils de plus en plus souples sont appliqués aux rangs supérieurs, jusqu'à atteindre α pour la valeur p la plus grande (Thissen et al., 2002). En optant pour cette approche plus libérale, nous avons été en mesure de montrer que les résultats des enfants de MS pouvaient être considérés comme statistiquement significatifs, en complément des résultats obtenus en CE1, CE2, CM1 et chez l'adulte. Le Tableau B.7 de l'Annexe B reporte les résultats de cette analyse.

notre connaissance. Pour autant, cette absence d'effet concorde avec l'étude de Guida et al. (2020b), qui a cherché à mesurer des associations spatio-positionnelles orientées de gauche à droite chez des participants scolarisés en cours préparatoire (âgés de sept ans en moyenne dans leur étude), sans pouvoir mettre en évidence cette préférence gauche-droite. La raison pour laquelle un biais spatial serait visible avant l'école élémentaire (comme montré dans l'Expérience 4) et disparaîtrait au moment même où le traitement directionnel gauche-droite devient un apprentissage explicite, notamment à travers la lecture et l'écriture, reste par ailleurs difficilement justifiable sur le plan théorique. Il existe un dernier résultat pour lequel des justifications théoriques semblent difficiles à établir. En effet, une spatialisation a été observée chez les enfants de CE1, CE2 et CM1 dans notre dernière expérience. Pourtant, là où nous espérions que l'effet se consolide avec l'âge, nos données suggèrent au contraire un affaiblissement du biais en CM2, comme en témoigne un résultat sensible à la correction de Bonferroni, ainsi qu'une taille d'effet modeste pour ce groupe d'âge ($p = .04$, h de Cohen $= 0.26$). Cependant, nous proposons que la fluctuation de l'effet observée entre groupes d'âge puisse avant tout s'expliquer par une variabilité statistique aléatoire, d'autant plus que la réponse explicite demandée dans la tâche implique une part de libre arbitre. Les analyses globales demeurent en faveur d'un biais gauche-droite général chez les enfants placés dans la condition Translation, étant donné qu'ils étaient trois fois plus susceptibles de choisir la boîte congruente que la boîte inverse (128 réponses congruentes contre 43 réponses inverses, tous groupes d'âge confondus).

2.6 Discussion générale intermédiaire

Les expériences menées dans ce deuxième chapitre visaient à étudier le développement d'une préférence gauche-droite dans le traitement d'une série d'éléments disposés horizontalement dans l'espace physique. Pour ce faire, nous avons basé nos investigations sur un paradigme de transposition vertico-horizontale – ou sagitto-horizontale en fonction du protocole utilisé –, impliquant un encodage abstrait de l'information sérielle (en ce sens qu'elle n'était reliée à aucun label numérique ou alphabétique explicite).

L'Expérience 1 n'a révélé aucun biais spatial gauche-droite chez les enfants, quel que soit leur groupe d'âge, en dépit d'un protocole expérimental s'étant avéré efficace chez l'adulte. Dans une deuxième étude, nous avons tenté de manipuler le référentiel utilisé par le participant durant la tâche (en favorisant un encodage sériel égocentrique et non allocentrique lors de la phase d'entraînement) pour optimiser la détection de l'effet. Cette manipulation ne nous a pas permis de mettre en évidence un biais significatif. Une troisième expérience a été menée afin de mieux contrôler la place de l'expérimentateur, tout en renforçant davantage l'utilisation d'un encodage proximal-distal lors des

essais d'entraînement. En dépit de ces modifications, aucune préférence gauche-droite n'a pu être détectée, les réponses des participants étant trop souvent caractérisées par des choix inverses. Nous avons tenté de justifier la prééminence des réponses inverses en avançant qu'un mécanisme de rotation mentale pouvait conditionner le traitement spatial de l'axe horizontal au moment du test, aboutissant à un traitement biaisé vers la droite dans le cas d'une rotation antihoraire. Dans une dernière étude, nous avons donc tenté de limiter le recours à cette rotation mentale en faisant en sorte que deux axes bien distincts soient visibles lors de la phase de transposition vertico-horizontale. Par le biais de ce nouveau protocole, un effet significatif a enfin pu être plus largement détecté. Cette étude a permis de montrer qu'une préférence gauche-droite dans le traitement de l'information sérielle abstraite est observable dès l'âge de quatre ans, bien que l'utilisation de nombreux échantillons et d'une correction statistique stricte n'ait pas permis d'établir clairement sa stabilité ni sa consolidation au-delà de cet âge.

En dépit de ces fluctuations, les résultats de ce deuxième chapitre viennent éclairer le développement d'associations spatio-positionnelles à partir d'une information sérielle dans un espace physique. De telles associations avaient déjà été examinées à l'aide d'un protocole comparable (McCrink et al., 2017 ; West & McCrink, 2021). Cependant, l'utilisation d'une information sérielle non labellisée dans les expériences de ce chapitre, couplée à l'inclusion de groupes d'âge plus avancés, donne à nos investigations une dimension nouvelle. Ces investigations ont notamment permis d'enrichir les résultats de West et McCrink (2021), en confirmant qu'une préférence gauche-droite s'observe chez l'enfant de quatre ans en l'absence de labels ordinaux explicites (les labels pouvant favoriser l'expression du biais). Nous avons également pu nuancer les résultats observés par ces auteurs chez l'enfant de cinq ans, en montrant ce que nous qualifierons prudemment d'une *tendance* à la spatialisation dans ce groupe d'âge. En croisant les études de ce chapitre, nous avons également été en mesure d'apporter des résultats plus cohérents que ceux précédemment observés chez l'adulte, en montrant qu'un biais spatial est effectivement détectable dans cette population par le biais d'une tâche de transposition. Que ce soit chez l'enfant ou l'adulte, ces éclaircissements ont été possibles notamment lorsque des mécanismes d'imagerie mentale de nature spatiale étaient rigoureusement contrôlés.

Concernant les fluctuations du biais spatial ayant été observées chez l'enfant, nos résultats suggèrent que le développement du biais suit une trajectoire irrégulière, alternant présences et absences de l'effet. Ces fluctuations ne sont pas sans rappeler celles observées par West et McCrink (2021). Pour rappel, les auteurs ont montré qu'un biais identifié chez l'enfant d'un an disparaissait aux alentours de deux et trois ans. Les auteurs ont proposé que cette trajectoire pouvait refléter l'extinction d'un biais gauche-droite inné, censé réémerger sous une forme culturellement déterminée. Cependant, ce même protocole n'a pas permis de détecter un biais spatial à des âges où notre

dernière étude en suggère pourtant la présence (chez l'adulte, et d'une manière plus modérée, chez l'enfant de cinq ans). De telles divergences appellent à questionner si l'extinction du biais identifié dans l'étude de West et McCrink (2021) serait également visible si un protocole de translation était appliqué à des enfants âgés d'un à trois ans (une tranche d'âge antérieure à celle testée dans l'Expérience 4, qui ne débutait qu'à quatre ans). Par ailleurs, le fait que nous ayons nous-mêmes observé des fluctuations dans nos différents groupes d'âge invite à réfléchir à des pistes d'amélioration pour renforcer le paradigme développé dans ce chapitre. Ces pistes concernent par exemple le nombre d'essais mobilisés pour détecter un biais spatial pour un même participant, ou encore la variable dépendante choisie pour quantifier la spatialisation (des pistes que nous développons plus amplement dans la Discussion Générale de cette thèse). En ajustant davantage notre protocole expérimental, nous espérons mieux caractériser l'origine des fluctuations observées chez l'enfant, tant dans la littérature que dans notre propre étude.

En définitive, ce deuxième chapitre a permis d'établir les bases d'un protocole simplifié destiné à mesurer des associations spatio-positionnelles élémentaires chez l'enfant. Bien que les processus sollicités dans notre tâche de transposition ne soient pas exactement les mêmes que ceux mobilisés dans des tâches de SPoARC, nous pensons que le biais spatial identifié dans ce chapitre pourrait constituer les prémices des associations spatio-positionnelles émergeant en mémoire de travail. Comme proposé dans l'introduction de ce chapitre, un parallèle peut en effet être établi entre ces deux types de paradigmes. Là où les tâches de SPoARC mesurent des associations spatio-positionnelles où les premiers items sont associés à la gauche et les derniers items à la droite au sein d'un espace *mental*, sans qu'aucune information sérielle ne soit présentée dans l'espace physique de l'individu, notre paradigme visait à mesurer ce type d'associations à partir d'une série d'items présentés dans l'espace physique de l'individu. Une différence notable réside entre les deux protocoles concernant l'implication de la mémoire de travail. Dans les tâches de SPoARC, cette dernière est fortement sollicitée, en raison du codage sériel nécessaire à la mémorisation d'une séquence d'items distincts, pour lesquels différentes associations spatio-positionnelles sont encodées. À l'inverse, notre paradigme ne requiert le maintien en mémoire que d'une seule association item/position au sein d'une séquence, d'abord encodée dans un référentiel vertical ou sagittal, puis devant être transposée dans un référentiel horizontal. En ce sens, la spatialisation mise en évidence chez l'enfant dans ce chapitre apparaît comme plus élémentaire que celle ayant pu être investiguée dans l'étude de van Dijck et al. (2020) – utilisant un protocole visant à détecter le SPoARC – ou celle de Guida et al. (2020b), qui repose sur un protocole simplifié mais impliquant néanmoins le maintien de deux items en mémoire de travail. L'aspect plus primaire du biais considéré ici justifie le fait qu'une tendance à la spatialisation gauche-droite ait pu être identifiée en dernière section de

maternelle dans notre dernière étude, à un âge où le SPoARC est difficilement détectable (Guida et al., 2020b ; van Dijck et al., 2020, mais voir aussi Ramos et al., 2023). Pour compléter les résultats apportés par le présent chapitre, le Chapitre 3 s'attachera à mettre en évidence la trajectoire développementale de la spatialisation lorsqu'elle est liée à des associations spatio-positionnelles plus complexes. Notre objectif sera d'explorer l'émergence du SPoARC chez l'enfant d'âge scolaire, en adoptant un protocole expérimental similaire à celui habituellement utilisé chez l'adulte.

Chapitre 3

Effet SPoARC chez l'enfant

Liens avec le langage écrit et la capacité mnésique

La première expérience de ce chapitre a fait l'objet d'une publication scientifique dans la revue *Attention, Perception, & Psychophysics* (Ftaïta*, Vivion*, Banks, Guida, Ramanoël, Fartoukh & Mathy, 2023)[1].

3.1 Introduction 102
3.2 Expérience 5 103
3.3 Expérience 6 134
3.4 Expérience 7 161
3.5 Discussion générale intermédiaire 181

[1] Les résultats de cette expérience ont également été présentés à l'occasion des conférences suivantes : *22nd Conference of the European Society for Cognitive Psychology* (2022), *63rd Annual meeting of the Psychonomic Society* (2022). Les résultats de l'Expérience 6 ont quant à eux été présentés lors de deux conférences : *64th Annual meeting of the Psychonomic Society* (2023), *Workshop 'Relations between space, language, and numbers'* (2024).

3.1 Introduction

Le Chapitre 2 a examiné les prémices de l'effet SPoARC chez l'enfant en mesurant l'émergence d'un biais spatial élémentaire dans le traitement d'une information ordinale non labellisée. Ces investigations ont permis d'observer qu'un tel biais tend à être détectable dès l'âge préscolaire, l'enfant appliquant préférentiellement un traitement orienté de gauche à droite lorsqu'il doit localiser une position donnée sur un axe horizontal présent dans son espace physique. Cependant, le SPoARC tel qu'il est décrit dans la littérature chez l'adulte diffère sensiblement de ce biais spatial élémentaire, dans la mesure où ce phénomène rend compte d'un recodage spontané d'une série d'informations verbales maintenues en mémoire de travail sur un axe mental horizontal orienté de gauche à droite, ainsi que des temps de réponse déterminés par cet axe. Par exemple, par le biais du paradigme de la grotte, Guida et al. (2020b) ont montré que des réponses congruentes avec l'application d'une spatialisation en mémoire de travail sont observables à partir du CE2, et qu'elles se maintiennent chez des enfants plus âgés. Cependant, ce paradigme de la grotte ne permet pas non plus d'étudier l'effet du recodage spatial sur les temps de réponse (ce paradigme permet uniquement une classification binaire des participants selon la présence ou l'absence de réponses caractéristiques d'une spatialisation).

Le présent chapitre vise par conséquent à étudier l'effet SPoARC chez l'enfant d'âge scolaire par le biais d'un paradigme fondé sur la mesure de temps de réaction. Une telle approche permettra premièrement de mesurer l'émergence de l'effet chez l'enfant sous des conditions expérimentales similaires à celles utilisées chez l'adulte, permettant une meilleure mise en correspondance des résultats obtenus dans ces deux populations. Un deuxième argument concerne la précision que peut offrir un protocole basé sur des temps de réponse dans l'estimation de l'effet à l'échelle individuelle. Un protocole basé sur les temps de réponse permet le calcul d'un coefficient de régression pour chaque participant, rendant à la fois compte de la magnitude et de l'orientation de l'effet SPoARC. En permettant une discrimination plus fine des individus selon leur spatialisation, ces mesures quantitatives s'avèrent cruciales pour la détection des facteurs impliqués dans le développement d'un SPoARC au fil de l'âge. En amont de ces expériences menées chez l'enfant, un premier travail consistera par ailleurs en l'identification des conditions les plus à même de générer un SPoARC de forte magnitude chez l'adulte, chez qui la spatialisation a été répliquée à l'aide de différentes configurations expérimentales. L'Expérience 5 s'attachera donc à faire varier différents critères méthodologiques dans le but d'observer une spatialisation maximale chez cette population. L'optimisation de la détection de l'effet chez l'adulte pourrait ainsi accroître les chances d'observer un effet robuste chez un public plus jeune, pour qui le SPoARC pourrait s'avérer plus sporadique.

3.2 Expérience 5

3.2.1 Objectif

Les publications relatives au SPoARC chez l'adulte comportent de nombreuses variations sur le plan méthodologique (Guida & Campitelli, 2019). L'un des exemples les plus significatifs concerne la diversité des stimuli grâce auxquels l'effet a pu être détecté avec succès : des chiffres et des mots (van Dijck & Fias, 2011), des lettres (Guida et al., 2016), des dessins concrets (Ginsburg et al., 2017) ou même des patchs de couleur (Guida et al., 2018b). Cependant, lorsque l'on considère la magnitude des pentes de spatialisation obtenues au niveau du groupe (i.e., l'effet SPoARC moyen), les résultats semblent produire des schémas erratiques. Previtali et al. (2010) ont, par exemple, utilisé conjointement des images et des mots dans une même étude, montrant que l'utilisation de stimuli imagés conduit à un plus grand effet SPoARC . De tels résultats suggèrent l'importance de considérer l'effet des conditions méthodologiques sous lesquelles le SPoARC peut être mesuré, en particulier lorsqu'il s'agit ensuite d'investiguer cet effet chez un public plus jeune. De façon critique, au-delà des stimuli traités par les participants, les procédures varient sur une quantité d'autres critères : la quantité de sondes présentées après la séquence à mémoriser, la taille de la séquence à retenir, la tâche effectuée après la phase de mémorisation (reconnaissance ou classification), la

[2] Leur sélection a été enrichie de huit études supplémentaires (identifiées en gras dans le Tableau 3.1) : six ayant été publiées après leur revue de littérature, et deux études antérieures qui n'avaient pas été incluses dans leur synthèse (mais que nous considérions malgré tout comme pertinentes pour notre analyse). À l'inverse, différentes études répertoriées par Guida & Campitelli ont été exclues de notre analyse. Les études menées par Rinaldi et al. (2015), Martarelli et al. (2017) et Antoine et al. (2017) ont été écartées de notre inventaire car elles ne s'appuyaient pas sur des temps de réponse pour mesurer la spatialisation. Sur ces trois études, les deux premières ont en effet enregistré les mouvements oculaires des participants, tandis que la troisième se basait sur une tâche de bissection de lignes pour détecter le SPoARC. L'étude réalisée par Boiteau & Almor (2017, Expérience 2) a également été écartée en raison d'un protocole portant essentiellement sur la spatialisation de la syntaxe (nommé *Syntax-Space Effect*). Cette étude a été remplacée par une expérience menée par Boiteau (2015, Expérience 4, à savoir la seule qui n'impliquait pas l'effet de syntaxe). Cette expérience plus conventionnelle nous a par ailleurs permis de considérer un nouveau type de stimulus dans notre analyse. Enfin, l'étude menée par Wang et al. (2018) n'apparaît pas dans notre sélection, car aucun coefficient de régression n'a été explicitement fourni par les auteurs. Au sein des 21 études listées dans le Tableau 3.1, l'Expérience 1.c (Previtali et al., 2010) a été écartée car les auteurs n'ont pas utilisé un paradigme typique dans la mesure du SPoARC (une détection de lettre au sein d'un mot cible, contre une tâche de classification pour l'Expérience 1.a et 1.b). Les Expériences 4.3, 4.4 et 5.1 (Ginsburg et al., 2014) ont également été écartées car elles visaient à mesurer un effet SNARC. L'Expérience 9.1 (van Dijck et al., 2015) a été écartée en raison de la nature de la variable dépendante utilisée pour évaluer le SPoARC (à savoir le type de préhension, globale *vs.* digitale). L'Expérience 13.5 (Ginsburg et al., 2017) a été exclue en raison de l'utilisation d'une suppression articulatoire ou d'une tâche motrice pendant la tâche de spatialisation. Les Expériences 16.2 et 16.3 (Zhou et al., 2019) ont été exclues car elles visaient à mesurer un SPoARC vertical. Enfin, les Expériences 19.2 et 19.3 (Shi et al., 2020) n'ont pas été incluses car les items n'étaient pas présentés au centre de l'écran. En définitive, notre sélection comporte un total de 38 expériences publiées avant octobre 2021, période à laquelle cette revue a été conduite.

Tableau 3.1 – Index des études répertoriées dans l'analyse comparative de l'effet SPoARC

N° de l'étude	Nom de l'étude	Coefficient de régression	Taille d'effet de l'ANOVA (η^2_p)
1.a	**Previtali et al. (2010)**	-8.71	-
1.b	**Previtali et al. (2010)**	-51.97	-
2.1	Van Dijck et Fias (2011)	-13.35	0.14
2.2	Van Dijck et Fias (2011)	-29.04	0.23
3.1	Van Dijck et al. (2013)	-4.99	0.12
3.2	Van Dijck et al. (2013)	-5.94	0.18
3.3	Van Dijck et al. (2013)	-4.12	0.13
4.1	Ginsburg et al. (2014)	-18.09	0.21
4.2	Ginsburg et al. (2014)	-15.61	0.14
5.2	Van Dijck et al. (2014)	-4.73	0.11
5.3	Van Dijck et al. (2014)	-8.3	-
6	**Boiteau (2015)**	0	-
7.1	De Belder et al. (2015)	-26	0.74
7.2	De Belder et al. (2015)	-17	0.58
8.1	Ginsburg et Gevers (2015)	-16.18	0.11
8.2	Ginsburg et Gevers (2015)	-12.46	0.1
9.2	Van Dijck et al. (2015)	-33	0.31
10	Bottini, et al. (2016)	-20	0.18
11	Guida et al. (2016)	-30	-
12	Huber et al. (2016)	-9.35	-
13.1	Ginsburg et al. (2017)	-16.22	0.1
13.2	Ginsburg et al. (2017)	-16.99	0.01
13.3	Ginsburg et al. (2017)	-13.95	0.1
13.4a	Ginsburg et al. (2017)	-27.5	0.16
13.4b	Ginsburg et al. (2017)	-27.24	0.18
13.4c	Ginsburg et al. (2017)	-20.77	-
13.6a	Ginsburg et al. (2017)	-38.33	0.31
13.6b	Ginsburg et al. (2017)	-16.91	0.14
14.1	Guida, Carnet, et al. (2018)	0	-
14.2	Guida, Carnet, et al. (2018)	-6.25	0.1
15	Guida, Megreya, et al. (2018)	-27.92	0.08
16.1	**Zhou et al. (2019)**	-40.58	0.33
17.a	**Guida, Abrahamse et al. (2020)**	-21.5	0.01
17.b	**Guida, Abrahamse et al. (2020)**	-50.5	0.04
18	**Guida, Mosinski, et al. (2020)**	-23.9	-
19.1	**Shi et al. (2020)**	-48.81	0.18
20	**Van Dijck et al. (2020)**	0	-
21	**Zhou et al. (2021)**	-47.83	0.49

Note. Le coefficient de régression est calculé sur la différence des temps de réponse entre les mains droite et gauche. Une valeur négative indique des réponses plus rapides de la main gauche pour les premiers items de la séquence et des réponses plus rapides de la main droite pour les derniers items (i.e., un SPoARC orienté de gauche à droite, comme attendu chez des individus occidentaux). Les études en gras correspondent aux travaux ajoutés à la synthèse initialement réalisée par Guida et Campitelli (2019). Pour toutes les études ayant effectué une analyse de variance dans leurs traitements statistiques, l'éta carré partiel (η^2_p) a été répertorié ou calculé (grâce à la valeur de la statistique F et les degrés de libertés) par le biais de la formule suivante :

$$\eta^2_p = \frac{F \times (k-1)}{F \times (k-1) + (N-k)} = \frac{F \times (ddl_{ef})}{F \times (ddl_{ef}) + (ddl_{er})}$$

où ddl_{ef} correspond au degré de libertés de l'effet et ddl_{er} au degré de liberté de l'erreur (voir Lakens, 2013, p.6). La Figure 3.1 illustre les effets répertoriés pour l'ensemble de ces études.

modalité de réponse (bimanuelle ou unimanuelle), et la présence ou non d'une tâche contrôlant l'encodage de l'ordre. Pourtant, peu d'études se sont attachées à comparer directement ces conditions expérimentales pour déterminer la meilleure façon de détecter la spatialisation. Une étude approfondie de la littérature sur le SPoARC nous a permis de dresser une synthèse de ces différentes procédures, dans le but d'analyser les conditions expérimentales ayant entraîné les effets les plus importants.

Le Tableau 3.1 répertorie un total de 21 études (pouvant être déclinées en plusieurs expériences), sur la base d'une sélection fournie par Guida et Campitelli (2019)[2]. La Figure 3.1 montre comment ces expériences peuvent être classées en fonction de deux critères jugés pertinents pour l'optimisation de notre protocole, à savoir le type de stimulus et la quantité de sondes présentées après la séquence mémorisée.

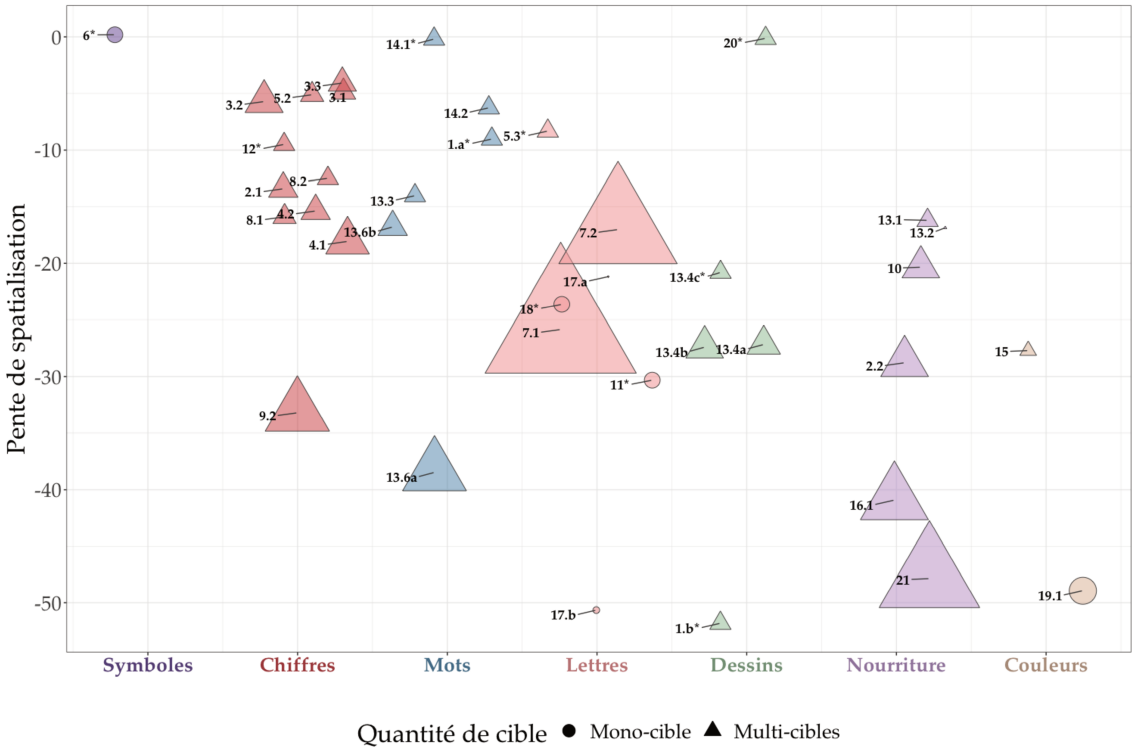


FIGURE 3.1 – Effet SPoARC des études répertoriées dans l'analyse comparative conduite pour l'Expérience 5. *Note.* L'axe des Y correspond au coefficient de régression de la différence des temps de réponse entre main droite et main gauche en fonction de la position de l'item dans la séquence. La taille de chaque point de donnée correspond à la grandeur de l'éta carré partiel associé à l'analyse de variance effectuée dans l'article. Les études pour lesquelles aucune taille d'effet n'a pu être calculée sont marquées d'une étoile (*), voir le Tableau 3.1 pour le détail de ces études. Le label « Nourriture » fait ici référence à des stimuli lexicaux (i.e., des mots présentés en modalité visuelle ou auditive) relatifs à la catégorie sémantique des fruits et des légumes. Figure inspirée de Banks (2022, p.6).

Au regard du type de stimulus, la Figure 3.1 montre que des coefficients de régression négatifs de plus grande amplitude sont observés pour des items visuels ou des

items pour lesquels une image mentale visuelle peut être facilement formée (dessins, couleurs, mots de toute catégorie, ou mots plus spécifiquement relatifs à de la nourriture). Il s'avère que l'hypothèse du tableau blanc (Abrahamse et al., 2014, 2017) donne un cadre explicatif pertinent à cette observation. En supposant que les items mémorisés sont représentés spatialement au sein d'un tableau mental, l'utilisation de stimuli se prêtant plus facilement à une visualisation devrait aboutir à un SPoARC d'une plus grande intensité. À cette observation s'ajoute la difficulté d'utiliser des stimuli véhiculant une valeur ordinale intrinsèque dans une tâche destinée à l'enfant. En effet, comparativement aux couleurs, aux mots ou aux images, les chiffres sont porteurs de caractéristiques spatiales cristallisées en mémoire à long terme, comme en témoigne l'effet SNARC. Ainsi, pour une séquence donnée à mémoriser dans une tâche de SPoARC (e.g., [7-9-3-1]), des marqueurs spatiaux différents peuvent entrer en concurrence pour un même item – le 7 étant associé à la fois à la droite si l'on considère sa position dans la suite numérique, et à la gauche si l'on considère sa position au sein de la séquence maintenue en mémoire. Une telle idée est d'ailleurs supportée par les travaux de Huber et al. (2016), qui ont montré que l'effet SPoARC et l'effet SNARC peuvent coexister en parallèle chez l'adulte. Un raisonnement similaire s'applique pour les lettres, bien qu'un effet spatial de plus faible intensité (voire nul) selon la manipulation expérimentale s'applique à ce matériel (e.g., Dehaene et al., 1993 ; Fischer, 2003 ; Goffin et al., 2020).

Parmi les différents stimuli susceptibles de faciliter la visualisation mentale, les symboles ont été rapidement écartés faute de données empiriques attestant de leur efficacité. Il en a été de même pour les patchs de couleur, qui, malgré leur accessibilité visuelle, pourraient susciter un traitement sémantique de plus bas niveau en comparaison à des mots ou des images concrètes (un traitement sémantique des items étant par ailleurs critique dans l'apparition du SPoARC, Ginsburg et al., 2017). Ces deux derniers types de stimulus ont donc été retenus pour nos comparaisons. D'après les résultats de Previtali et al. (2010), l'utilisation d'images concrètes devrait induire une spatialisation en mémoire de travail plus marquée, en comparaison avec des mots renvoyant aux mêmes signifiés. Le recours à ces items facilitateurs pourrait, à terme, accroître les chances de détecter un SPoARC chez un plus jeune public.

Un second élément notable ressortant de la Figure 3.1 concerne la prédominance de la procédure multi-cibles, qui consiste en la présentation de différentes sondes pour tester la mémorisation après chaque séquence. Une telle prévalence soulève des interrogations quant à l'efficacité d'une condition mono-cible – qui, à l'inverse, vise à présenter soit un seul item cible, soit un seul item leurre après la phase de mémorisation. Sur le plan méthodologique, la procédure multi-cibles offre l'avantage de permettre le recueil d'un grand nombre de données sur une durée de tâche limitée, en comparaison avec une approche mono-cible. Pour cause, le temps de réaction à une cible est beaucoup

plus court que le temps de présentation d'une séquence. Il paraît donc avantageux de présenter plusieurs tests pour une séquence. Sur le plan théorique, il peut être envisagé que la condition multi-cibles soit favorable au SPoARC dans la mesure où les tests successifs inciteraient à des balayages itératifs de la séquence en mémoire, susceptibles de renforcer ses associations spatio-positionnelles. À l'inverse, une condition mono-cible ne sollicite qu'une seule réactivation mnésique. Néanmoins, les tests successifs d'une procédure multi-cibles pourraient également accroître l'interférence de sortie (communément appelée *output interference* dans la littérature, Criss et al., 2011), qui renvoie à la difficulté croissante à rappeler les derniers items lorsque plusieurs tests se succèdent (les leurres interférant de façon rétroactive avec les items de la séquence, conduisant progressivement à une dégradation de la trace mnésique). La possibilité qu'une telle interférence soit moins propice à l'expression d'un SPoARC est plausible, notamment en raison d'un rappel de moins en moins efficace au fil des tests – étant donné que les balayages successifs peuvent être contaminés par les leurres – couplé à la difficulté de reconnaître différents items dans un ordre aléatoire (un ordre susceptible d'affecter l'ordre initial de la séquence, et donc subséquemment les associations spatio-positionnelles). Ainsi, la comparaison de ces deux procédures s'avère pertinente dans l'élaboration d'un paradigme optimal, notamment en raison d'une sous-représentation de l'approche mono-cible dans la littérature. Nos prédictions au regard de cette comparaison tendent à favoriser l'approche mono-cible car, bien que rarement utilisée, cette procédure a donné lieu à des pentes de spatialisation relativement élevées (Guida et al., 2020a ; Shi et al., 2020). Ainsi, nous supposons que la diminution du nombre de sondes après la séquence mémorisée peut favoriser l'apparition d'un SPoARC dans nos résultats.

Pour résumer, deux facteurs ont été manipulés dans cette étude afin d'isoler le protocole le plus à même de générer un effet SPoARC maximal. Concernant le type de stimulus, il était attendu que des stimuli imagés favoriseraient la spatialisation en raison de leur nature visuelle. Concernant le nombre de sondes, nous nous attendions à ce que la présentation d'un seul item après la phase de mémorisation aboutisse à un effet plus précis (i.e., mieux défini sur le plan de la spatialisation, car mesuré sur une seule position par séquence). Par ailleurs, il était attendu que ces deux effets soient simplement additifs, sans interaction entre les deux facteurs d'intérêt. Le protocole expérimental retenu pour la mesure du SPoARC consistait en une tâche de reconnaissance à réponse bimanuelle, déjà éprouvée dans des études antérieures (Guida et al., 2016, 2018a, 2018b ; Guida & Porret, 2022). Dans l'optique où ce protocole serait par la suite administré à un public plus jeune, la tâche de reconnaissance a été préférée aux tâches de classification en Go/no-Go retrouvées par exemple dans les travaux de Ginsburg et al. (2014, 2017), van Dijck et Fias (2011) et Zhou et al. (2019) ou de Zhou et al. (2021). La spatialisation devant être mesurée sur un nombre substantiel d'essais,

une tâche de Go/No-Go était pressentie comme trop exigeante sur le plan cognitif, du fait des ressources inhibitrices qu'elle sollicite. Outre le fait que ces fonctions inhibitrices se développent progressivement jusqu'à l'âge adulte (Williams et al., 1999), la littérature indique que la performance à une tâche de Go/No-Go diffère sensiblement entre 7 et 12 ans, notamment en ce qui concerne la précision et la régularité des réponses (voir par exemple Johnstone et al., 2007). Des enfants âgés de moins de 10 ans sont également plus susceptibles de produire des réponses impulsives (Jonkman, 2006). Cette tranche d'âge correspondant aux études développementales que nous souhaitions conduire, la fiabilité d'une comparaison intergroupe aurait ainsi pu être compromise par une procédure Go/no-Go.

La tâche de reconnaissance proposée dans cette étude débutait par la mémorisation d'une série de quatre items – une longueur de séquence retrouvée dans la plupart des travaux portant sur la spatialisation en mémoire de travail (de Belder et al., 2015 ; Ginsburg et al., 2017 ; Guida et al., 2018b ; Guida & Porret, 2022 ; van Dijck et al., 2013, 2014 ; Zhou et al., 2019, 2021). Pour la moitié des participants, ces items consistaient en des dessins colorés de fruits (condition « Image »), tandis que l'autre moitié se voyait présenter les noms de ces mêmes fruits écrits en toutes lettres (condition « Mot »). À la suite de cette phase de mémorisation, le participant était soumis à une phase de reconnaissance dans laquelle il devait indiquer si un nouvel item faisait partie de la séquence tout juste encodée ou non. Pour la moitié des participants, une seule sonde – soit un item cible, soit un item leurre – était proposée lors de cette phase de reconnaissance (condition « Mono-cible »). Pour l'autre moitié des participants, une série de huit sondes successives était présentée avant de passer à l'essai suivant (condition « Multi-cibles »). Ces conditions expérimentales ont été croisées afin d'obtenir quatre groupes (« Mono-image », « Mono-mot », « Multi-image » et « Multi-mot »), les participants étant répartis de manière équitable entre ces quatre modalités. La mémorisation de l'ordre n'a pas été vérifiée dans notre tâche, à la différence des études de van Dijck et al. (2011, 2013), Ginsburg et al. (2014, 2017) ou Zhou et al. (2019, 2021). Ce choix se fonde sur des travaux antérieurs ayant détecté un SPoARC sans pour autant avoir proposé cette étape dans leur protocole expérimental (Guida et al., 2016, 2018a, 2020a, 2020c ; Shi et al., 2020), mais également sur le fait que l'ordre avant (i.e., orienté de la première position vers la dernière) reste la manière la plus spontanée de rappeler les items d'une séquence (voir notamment Lewandowsky et al., 2009, Tableau 1 et 2)[3]. L'absence de vérification de la mémorisation de la séquence dans l'ordre présentait

[3] Il est à noter que cette même étude montre que le second ordre préférentiel consiste à rappeler le dernier item, pour retourner ensuite au premier élément rappeler le reste de la liste en ordre avant. Cependant, la probabilité de rappeler le dernier item en premier lieu tend à augmenter à mesure que la liste est longue (Tan & Ward, 2007 ; Ward et al., 2010), et reste faible pour des listes de courte longueur. Pour des listes de quatre items par exemple, la probabilité d'initier le rappel par le dernier item est d'environ 30%, contre 70% pour le premier item (Ward et al., 2010, Tableau 2 et Figure 2).

notamment l'avantage d'alléger sensiblement la durée de la passation, un critère non négligeable dans la perspective des études développementales à venir. Enfin, d'un point de vue théorique, il semblait également pertinent d'étudier la présence d'associations spatio-positionnelles en mémoire de travail alors même qu'un traitement *explicite* de l'ordre n'est pas requis durant la tâche. Alors qu'une telle automaticité est connue dans la littérature sur l'adulte, son existence chez l'enfant reste à établir (le peu d'études développementales portant sur le SPoARC ayant toutes proposé un rappel de la séquence avant ou après la phase de test, voir Guida et al., 2020b ; van Dijck et al., 2020).

3.2.2 Méthode

3.2.2.1 Participants

Une analyse de puissance a été conduite à l'aide du logiciel G*Power 3.1 (Faul et al., 2009) pour déterminer la taille d'échantillon requise pour cette étude. Dans la littérature, l'effet SPoARC est généralement évalué par le biais d'un t de Student visant à déterminer si la pente de régression diffère significativement de zéro. La taille de l'échantillon a été estimée à 34 participants par condition, pour un test t bilatéral, avec un risque de première espèce $\alpha = .05$, une puissance statistique $(1 - \beta) = .80$ et une taille d'effet de $d = .50$ (basée sur Guida & Porret, 2022, qui ont identifié une taille d'effet de $d = .51$ dans leur étude). Cette taille d'échantillon concorde avec celle retrouvée dans de précédents travaux (i.e., entre 30 et 35 participants, e.g., Ginsburg et al., 2014, Exp.1 et 2 ; Guida et al., 2016 ; Huber et al., 2016 ; Ginsburg et al., 2017, Exp.1, 2 et 3 ; Guida et al., 2018a, 2020c ; Guida & Porret, 2022 ; Shi et al., 2020 ; Zhou et al., 2019, 2021). Un échantillon de 137 étudiants de deuxième année de Psychologie a donc été recruté. Les participants ont été répartis de manière aléatoire dans les quatre conditions expérimentales évoquées précédemment, pour un effectif de 34 individus par condition (à l'exception de la condition Mono-image qui en regroupait 35).

Suite aux passations, deux participants ont été exclus en raison d'une mauvaise compréhension des consignes et deux autres participants ont été écartés car ils ne respectaient pas les critères d'inclusion retenus pour cette étude (i.e., présence d'une dyslexie rapportée via auto-questionnaire). Sur les 133 participants restants, tous présentaient une acuité visuelle normale ou corrigée, et aucun ne présentait de trouble moteur, cognitif ou psychique connu. L'échantillon final regroupait 122 femmes et 11 hommes (âge moyen = 19.9 ans, $ET = 1.4$) ; pour un total de 116 droitiers, 14 gauchers et trois ambidextres. Sur l'ensemble des participants, 121 étaient de langue maternelle

française [4]. Tous les participants ont renseigné un formulaire de consentement et ont obtenu un point bonus sur leur note de statistique en échange de leur participation. Bien qu'à ce jour la spatialisation ne fasse l'objet d'aucun enseignement au sein de la formation suivie par les étudiants recrutés, la naïveté de chaque participant concernant l'effet SPoARC a été vérifiée au moment du débriefing.

3.2.2.2 Matériel

Les programmes utilisés pour cette étude ont été élaborés à l'aide du logiciel PsychoPy (Peirce et al., 2019). La tâche était présentée sur un écran d'ordinateur de 13 pouces (1440 x 900 pixels) pour 50% des participants, et de 16 pouces (3072 × 1920 pixels) pour l'autre moitié des participants. Le fond d'écran utilisé pour l'expérimentation était d'un gris moyen, choisi afin d'éviter une trop grande fatigue visuelle (le gris étant une couleur achromatique présentant la même teinte et le même niveau de saturation que le blanc mais avec une luminance deux fois plus faible Heurley, 2012, Tableau IX, p. 111). Les temps de réponse ont été collectés à l'aide des touches « S » et « L » du clavier.

Stimuli Des stimuli issus de la catégorie sémantique des fruits ont été utilisés en raison de leur familiarité et de leur caractère concret. Cette catégorie, souvent associée à celle des légumes dans les tâches de classification fruits-légumes utilisées pour mesurer le SPoARC, figure parmi les plus couramment employées dans les études ayant mis en évidence un effet significatif (juste après les chiffres et les lettres, voir par exemple Bottini et al., 2016 ; Ginsburg et al., 2017 ; van Dijck & Fias, 2011 ; Zhou et al., 2019, 2021). Une liste de dix noms de fruits a été constituée (« banane », « cerise », « citron », « framboise », « grenade », « kiwi », « myrtille », « orange », « pastèque » et « raisin »). Ces noms ont été sélectionnés sur la base de quatre critères lexicaux : le nombre de syllabes (la liste ne contenant que des mots bisyllabiques), leur fréquence, leur imageabilité et leur âge d'acquisition. Ces informations ont été recueillies à partir de plusieurs bases de données regroupées au sein de la plateforme OpenLexicon. Le Tableau C.1 en Annexe C détaille l'ensemble de ces caractéristiques pour chaque nom de fruit.

Pour la moitié des participants, ces dix noms de fruits étaient présentés sous forme de dessins de couleur. Ces images ont été extraites de la base de données IMABASE de Bonin et al. (2020) pour les mots « banane », « cerise », « citron », « orange », « pastèque » et « raisin ». Les images utilisées pour les mots « framboise », « grenade »,

[4] Sur les 12 participants n'étant pas de langue maternelle française, quatre d'entre eux étaient de langue maternelle arabe et trois de langue maternelle espagnole. Les cinq étudiants restant étaient respectivement de langue maternelle anglaise, bulgare, portugaise, albanaise et tagalog.

« kiwi » et « myrtille » étaient des images libres de droits tirées d'Internet. Ces quatre images ont par ailleurs été retravaillées à l'aide du logiciel Inkscape (Inkscape Project, 2020) pour se rapprocher des images issues d'IMABASE. Pour l'autre moitié des participants, les dix noms de fruits étaient écrits en toutes lettres à l'écran. Ces mots étaient de couleur noire et en police Arial de taille 60.

Élaboration des séquences À partir de cette liste de dix fruits, des séquences de quatre items ont été créées pour chaque essai. Le nombre total de séquences présentées aux participants différait en fonction de la condition expérimentale (Mono-cible ou Multi-cibles), et ce afin de garantir une durée d'expérimentation constante entre les échantillons. En condition Mono-cible, les participants devaient mémoriser un ensemble de 60 séquences divisées en deux sous-groupes homogènes de 30 essais chacun (« Bloc 1 » et « Bloc 2 »). En condition Multi-cibles, 32 séquences ont été présentées aux participants, également réparties en deux sous-groupes de 16 essais chacun. Par ailleurs, chaque sous-groupe de séquence était associé à une assignation réponse/-main donnée (par exemple, les participants répondaient « oui » de la main droite et « non » de la main gauche pour le premier sous-groupe, et inversement pour le deuxième sous-groupe). Ainsi, chaque participant prenait part à deux sessions expérimentales, chacune impliquant des assignations réponse/main et des séquences distinctes. Quelle que soit la condition, l'ordre de présentation entre le Bloc 1 et le Bloc 2 était contrebalancé entre les participants. De plus, l'assignation réponse/main associée à chaque sous-groupe était également contrebalancée, aboutissant à quatre permutations possibles pour la Session 1 : Bloc 1/Oui-Gauche, Bloc 1/Oui-Droite, Bloc 2/Oui-Gauche et Bloc 2/Oui-Droite.

Pour la condition Mono-cible, la fréquence d'apparition de chaque fruit pendant la phase de mémorisation a été contrôlée de sorte que chaque item de la liste soit vu le même nombre de fois pour chaque position dans la séquence, et ce sur chacune des sessions. Pour chacun des deux sous-groupes de 30 séquences, chaque item a été présenté trois fois en première, deuxième, troisième et quatrième position, pour un total de 12 occurrences par session, soit 24 occurrences sur l'ensemble de la tâche. Pour la condition Multi-cibles, étant donné que le nombre d'items par séquence et que le nombre de séquences par session ne permettaient pas un équilibrage parfait, les fréquences ont été contrôlées de sorte à homogénéiser au mieux le nombre d'occurrences de chaque fruit par position. Le Tableau C.2 en Annexe C reprend le nombre d'occurrences par fruit et par position sur l'ensemble de la tâche.

Pour chaque séquence à mémoriser, une série de sondes a été élaborée pour la phase de reconnaissance. Dans la condition Mono-cible, la série ne comportait qu'un

seul item, contre huit items en condition Multi-cibles[5]. Quelle que soit la condition, 50% des items présentés pendant la phase de reconnaissance correspondaient à un item cible qui faisait partie de la séquence à mémoriser. Pour les 50% restants, l'élément présenté était un item leurre qui n'était pas présent dans la séquence. En condition Mono-cible, un participant devait donc identifier 15 items cibles et 15 items leurres par session, soit 30 cibles et 30 leurres sur l'ensemble de la tâche. Le nombre total de séquences différant d'un multiple de quatre en condition Mono-cible – permettant par ailleurs une durée de tâche équivalente à la condition Multi-cibles – a empêché une distribution uniforme des tests pour chaque position d'intérêt (P1-P2-P3-P4). Ainsi, pour chaque session, les première, deuxième et quatrième positions ont été testées chacune quatre fois, contre trois fois pour la troisième position (P1 = 8 tests, P2 = 8 tests, P3 = 6 tests et P4 = 8 tests, sur l'ensemble de la tâche). L'occurrence de chaque fruit dans la phase de reconnaissance a également été contrôlée, de sorte que chacun des dix items soit présenté trois fois dans chacune des sessions, pour un total de six occurrences par fruit au moment du test sur l'ensemble de la tâche.

Dans la condition Multi-cibles, chaque série de sondes comprenait quatre items leurres et les quatre items cibles mémorisés par le participant. Ce dernier devait donc répondre à 64 cibles et 64 leurres par session, soit 128 cibles et 128 leurres sur l'ensemble de la tâche. Les quatre items cibles étant systématiquement présentés lors de la phase de reconnaissance, un nombre équivalent de temps de réponse a pu être collecté pour les quatre positions d'intérêt. Chaque position était ainsi testée 16 fois par session, pour un total de 32 tests par position sur l'ensemble de la tâche. L'ordre dans lequel ces positions ont été testées lors de la phase de reconnaissance a été contrebalancé pour éviter la récurrence de patterns spécifiques. Un sous-ensemble de 16 permutations a été extrait des 24 arrangements possibles des quatre cibles à détecter (par exemple, [P1-P3-P2-P4] pour la première séquence, [P4-P2-P3-P1] pour la deuxième, etc.). Par ailleurs, le rang de ces items cibles au sein de la série de huit sondes a été contrôlé de sorte à éviter des schémas d'alternance trop prévisibles entre cibles et leurres. Pour cela, des combinaisons de quatre rangs possibles parmi huit ont été sélectionnées aléatoirement pour y placer des items cibles, les autres rangs étant attribués aux items leurres (par exemple, [L-P1-L-P3-L-L-P2-P4] pour la première séquence, [L-L-P4-P2-L-P3-P1-L] pour la deuxième, etc.). Les permutations impliquant le traitement de trois leurres ou de trois cibles à la suite ont été écartées. Des précautions ont également été prises afin d'équilibrer le nombre total de cibles et de leurres par rang (pour éviter par exemple que la phase de test ne débute avec 70% d'items cibles et seulement 30% d'items leurres sur l'ensemble de la tâche). Ainsi, chaque rang comptait un total de huit cibles et huit leurres par session, soit 16 cibles et 16 leurres sur l'ensemble de la passation. Enfin, il

[5] Une série de huit sondes permettant de tester le participant sur chacun des items présent dans la séquence, et sur un nombre équivalent d'items leurres.

a été tenté au mieux de garantir une présentation équilibrée de chaque fruit dans la phase de reconnaissance (les occurrences de chaque item en fonction du rang dans la série de sondes étant reportées dans le Tableau C.3 en Annexe C).

3.2.2.3 Procédure

Les passations se sont déroulées dans une salle calme et ont duré approximativement une heure. Le participant était placé à environ 50 cm de l'écran. L'expérimentateur, assis en face, suivait la passation sur un écran annexe pour veiller à son bon déroulement. Celui-ci déclenchait manuellement chaque essai en cliquant sur une souris secondaire, tout en s'assurant au préalable que le participant était suffisamment concentré. Dans le cas contraire, celui-ci était invité à remobiliser son attention avant de débuter la phase de mémorisation.

Le participant complétait deux sessions expérimentales, chacune étant associée à une assignation réponse/main différente. Une session débutait par la présentation des consignes, qui rappelaient au participant de garder ses mains en permanence sur les touches du clavier afin de pouvoir répondre le plus rapidement possible. Après avoir lu les consignes, le participant complétait quatre séquences d'entraînement pour se familiariser avec la tâche. S'ensuivait une phase de test, lors de laquelle 30 séquences (condition Mono-cible) ou 16 séquences (condition Multi-cibles) étaient présentées dans un ordre aléatoire. Avant de débuter cette phase de test, il était systématiquement demandé aux participants de la condition Image s'ils étaient bien en mesure de nommer tous les fruits de la liste.

Chaque essai débutait avec la phrase « Attention, début de l'essai » , qui restait visible à l'écran jusqu'à ce que l'expérimentateur clique sur la souris pour démarrer la phase de mémorisation. Par la suite, quatre items étaient présentés un à un au centre de l'écran, pour une durée d'affichage de 4000 millisecondes par item et un intervalle inter-item de 1000 millisecondes (voir la Figure 3.2, Étape 1 : Mémorisation). Après la présentation de la séquence, une croix de fixation apparaissait à l'écran pendant 2000 millisecondes, suivie d'une sonde (soit un item cible, soit un item leurre), elle aussi affichée au centre de l'écran pour une durée maximale de 3500 millisecondes[6]. Pendant ce laps de temps, le participant devait indiquer sa réponse en appuyant soit sur la touche « S », soit sur la touche « L » du clavier pour indiquer si l'item faisait partie ou non de la séquence mémorisée (la nature des réponses étant contrebalancée entre les sessions). Deux gommettes de couleur distinctes (rouge et vert) étaient apposées sur ces deux touches afin d'aider le participant à se souvenir de l'assignation réponse/-main en vigueur. Les absences de réponse ou les réponses effectuées au-delà des 3500

[6] Un temps de présentation suffisamment long tend à favoriser l'émergence du SPoARC lorsque la présentation des items est centrale (voir Guida et al., 2020a).

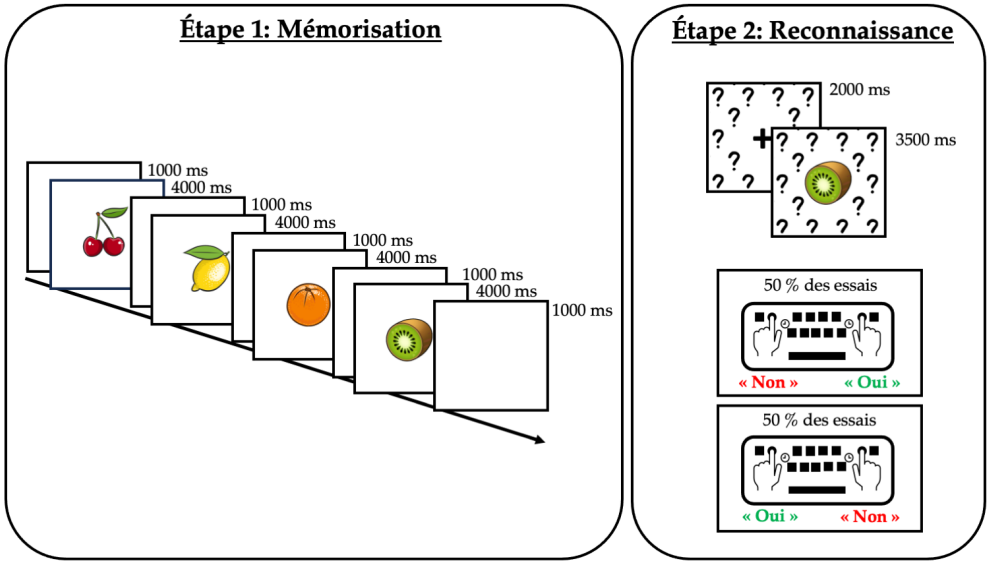


FIGURE 3.2 – Tâche de spatialisation utilisée dans l'Expérience 5 en condition Image. *Note.* La même procédure a été appliquée en condition Mot, à la différence que des noms de fruits écrits en toutes lettres étaient présentés au centre de l'écran.

millisecondes imparties étaient considérées comme incorrectes.

Un fond rempli de points d'interrogation servait d'arrière-plan lors de la phase de test (depuis l'affichage de la croix jusqu'à l'affichage de la sonde), permettant de rappeler au participant que la phase de test était engagée et qu'une réponse était attendue (voir la Figure 3.2, Étape 2 : Reconnaissance). Après l'enregistrement d'une réponse – ou, à défaut, au bout de 3500 millisecondes – le programme passait automatiquement à l'essai suivant dans la condition Mono-cible. Dans la condition Multi-cibles, la présentation des sondes continuait automatiquement pour un total de huit tests successifs, chacun débutant par une nouvelle croix de fixation. Pour chaque réponse donnée par le participant, un temps de réaction exprimé en millisecondes était enregistré. Aucun *feedback* n'était fourni au participant concernant l'exactitude de ses réponses et il ne lui était pas demandé de rappeler la séquence à l'issue de la phase de reconnaissance.

Une fois la première session expérimentale achevée, une pause de cinq minutes était proposée au participant. S'ensuivait alors une deuxième session expérimentale, identique à la première, à la différence qu'une assignation réponse/main opposée était appliquée. Pour la moitié des participants, la réponse « Oui » était assignée à la main gauche lors de la première session et à la main droite lors de la deuxième, et inversement pour l'autre moitié des participants. Une fois les deux sessions complétées, un temps d'échange avec le participant était alloué pour lui faire part des objectifs de l'étude et des hypothèses de recherche.

3.2.3 Résultats

3.2.3.1 Analyses préliminaires

Taux de réussite Les données de deux participants ont été exclues des analyses en raison d'un taux de réponses correctes inférieur au seuil du hasard (40% et 48%, voir Guida et al., 2018a, 2018b ; Guida & Porret, 2022). Sur l'ensemble de la tâche, les participants restants ont obtenu une proportion moyenne de réponses correctes égale à 0.95 ($ET = 0.04$, $min = .75$, $max = 1$). Les 5% de données incorrectes correspondaient soit à des erreurs de mémorisation, à des absences de réponse ou encore à des réponses effectuées au-delà de 3500 ms. Une ANOVA à deux facteurs (2×2) a été réalisée pour évaluer si le taux de réussite à la tâche variait en fonction de la quantité de sondes (à deux niveaux : Mono-cible *vs.* Multi-cibles) et du type de stimulus (à deux niveaux : Image *vs.* Mot). Les résultats ont indiqué un effet significatif de la quantité de sondes, les participants ayant un taux de réussite plus élevé en condition Multi-cibles ($m = .96$, $ET = 0.03$) par rapport à la condition Mono-cible ($m = .94$, $ET = 0.05$, $F(1, 127) = 4.08, p = .045, \eta^2_p = .031$). Aucune différence significative n'a été identifiée entre les conditions Image et Mot ($m_{Image} = .95$, $ET = 0.03$, $m_{Mot} = .95$, $ET = 0.04$; $F(1, 127) = 0.51, p = .478, \eta^2_p = .004$). L'interaction entre les deux facteurs ne s'est pas avérée significative ($F(1, 127) = 0.76, p = .386, \eta^2_p = 0.006$, voir le Tableau C.4 en Annexe C pour le détail des performances pour chaque condition expérimentale).

La même analyse a été conduite en se limitant aux items appartenant à la séquence mémorisée (seuls les essais relatifs à ces items sont pris en compte dans l'analyse du SPoARC). La proportion globale de réponses correctes était légèrement plus faible ($m = .94$, $ET = 0.05$, $min = .73$, $max = 1$). L'analyse de variance n'a révélé aucun effet significatif de la quantité de sondes ($m_{mono} = .94$, $ET = 0.06$, $m_{multi} = .94$, $ET = 0.04$; $F(1, 127) = 0.03, p = .871, \eta^2_p = .000$) ou du type de stimulus ($m_{image} = .93$, $ET = 0.05$, $m_{mot} = .94$, $ET = 0.05$; $F(1, 127) = 2.50, p = .116, \eta^2_p = .019$) sur le taux de bonnes réponses. De plus, aucune interaction significative entre les deux facteurs n'a été mise en évidence ($F(1, 127) = 1.56, p = .214, \eta^2_p = .012$, voir le Tableau C.4 en Annexe C pour le détail des performances observées dans chaque modalité).

Des analyses complémentaires ont été conduites afin d'estimer si les items sélectionnés dans notre tâche pouvaient engendrer des taux de réussite différenciés en raison, par exemple, d'une saillance visuelle dans la condition image (couleur ou forme), ou de propriétés orthographiques facilitatrices dans la condition mot (longueur ou transparence grapho-phonémique). Une ANOVA mixte (2×10) a été conduite pour tester l'effet de l'item (i.e., les 10 fruits) et du type de stimulus (forme imagée ou lexicale) sur le taux de bonnes réponses. Cette analyse n'a pas révélé d'effet significatif de l'item sur la précision des réponses, que ce soit lorsque l'effet de ce facteur était considéré de manière isolée

($F(9, 1161) = 0.97, p = .464, \eta_p^2 = 0.007$) ou en interaction avec le type de stimulus ($F(9, 1161) = 1.13, p = .335, \eta_p^2 = 0.009$). En définitive, les participants ont répondu de façon comparable aux différents items, qu'ils aient été présentés sous leur forme imagée ou lexicale. Le Tableau C.5 et la Figure C.1 en Annexe C rendent compte des pourcentages de bonnes réponses obtenus pour chaque fruit. La même analyse conduite uniquement sur les réponses aux items cibles a révélé les mêmes patterns de résultats, à savoir une absence d'effet du facteur item ($F(9, 1152) = 1.02, p = .421, \eta_p^2 = .008$) ou d'effet d'interaction entre l'item et le type de stimulus ($F(9, 1152) = 1.56, p = .123, \eta_p^2 = .012$, voir le Tableau C.5 et la Figure C.2 en Annexe C pour le détail des taux de bonnes réponses relatifs à ces analyses).

Winsorisation des données Sur l'ensemble des données recueillies, les temps de réponse associés à la reconnaissance de leurres et à des réponses incorrectes aux items cibles ont été exclus des analyses, ces derniers n'étant pas utilisables dans la mesure d'un effet SPoARC. Une harmonisation des temps de réponse a été réalisée en suivant une procédure de winsorisation (Reifman & Keyton, 2010 ; Rivest, 1994). Cette méthode s'avère utile dans l'analyse statistique de ce type de variable dépendante, car elle permet de minimiser l'impact de valeurs extrêmes tout en gardant un nombre équivalent de données pour chaque participant. La winsorisation s'est déroulée comme suit : pour chaque participant, un temps de réaction moyen a tout d'abord été calculé. Un seuil inférieur et un seuil supérieur ont ensuite été déterminés en prenant pour référence les valeurs situées à $\pm$ deux écarts-types de cette moyenne individuelle. Tous les temps de réponse situés entre ces deux seuils ont été conservés. En revanche, les valeurs se situant en dehors de ces deux limites ont été remplacées. Par exemple, pour un temps de réponse inférieur à la limite fixée à -2 écarts-types, la valeur brute a été remplacée par la valeur située à précisément -2 écarts-types de la moyenne du participant. Cette opération a été réalisée sur 4.6% des temps de réponse collectés dans cette étude (voir Guida et al., 2020a, pour une démarche similaire). Le temps de réponse moyen sur l'ensemble de l'expérience était de 734 ms (ET = 277 ms). Une absence de corrélation significative entre le temps de réponse et l'exactitude des réponses a pu indiquer que les participants ne tendaient pas à faire plus d'erreurs lorsqu'ils répondaient plus rapidement ($\rho = .035$, $p = .694$).

Dans cette étude, l'effet SPoARC a été investigué en suivant quatre étapes successives. Les temps de réponse ont tout d'abord fait l'objet d'une analyse de variance – une analyse communément utilisée dans les études sur le SPoARC – dans le but d'observer l'interaction caractéristique de la spatialisation (impliquant la position de l'item dans la séquence et la main utilisée pour répondre lors de la phase de reconnaissance). La variation d'un effet SPoARC en fonction de nos différentes conditions expérimentales a également été testée par le biais de cette analyse de variance.

Dans un second temps, notre analyse a pu être affinée à l'aide de modèles linéaires mixtes généralisés, une méthode encore peu utilisée dans le domaine (voir par exemple Guida et al., 2016, 2020c), mais présentant de nombreux avantages dans l'analyse des temps de réponse lorsqu'on ne souhaite pas agréger les données. Pour mieux rendre compte de la nature d'une éventuelle interaction Position × Main, l'effet SPoARC a dans un troisième temps été investigué par le biais d'une analyse de régression linéaire à mesures répétées (Lorch & Myers, 1990), un type d'analyse que l'on retrouve dans une vaste majorité des travaux portant sur la spatialisation. Dans cette analyse, une transformation de la variable dépendante a été réalisée pour chaque participant en calculant des différences de temps de réponse moyennes entre la main gauche et la main droite pour chaque unité du facteur Position. Les pentes de spatialisation résultant de cette analyse ont été examinées selon les différentes conditions expérimentales. Enfin, dans une quatrième et dernière analyse, la robustesse de l'effet a été investiguée à l'échelle individuelle par le biais d'une analyse *bootstrap* (Cipora et al., 2019), et ce dans le but d'identifier si une condition donnée avait pu générer un nombre plus conséquent de spatialiseurs.

3.2.3.2 Effet de spatialisation : ANOVA

La présence d'un effet SPoARC et sa variation en fonction des conditions expérimentales a tout d'abord été évaluée à l'aide d'une analyse de variance. Pour ce faire, les temps de réponse des participants ont été log-transformés (Berry, 1987 ; Oberauer, 2005 ; voir Guida et al., 2018b, 2020a ; Guida & Porret, 2022, pour une application dans le cadre du SPoARC) afin de normaliser la distribution de la variable dépendante, qui présentait une asymétrie positive ($skewness = 1.5$, voir la Figure C.3 en Annexe C) . Une ANOVA mixte ($2 \times 4 \times 2 \times 2$) a été appliquée en prenant la position de l'item dans la séquence (à quatre niveaux : 1, 2, 3, 4) et la main de réponse (à deux niveaux : Droite et Gauche) en facteurs intra-sujet, et le type de stimulus (à deux niveaux : Image et Mot) ainsi que la quantité de sondes (à deux niveaux : Mono et Multi) en facteurs inter-sujet. L'ANOVA a été réalisée sur les données agrégées par position, par main et par sujet. À chaque participant correspondait ainsi huit cellules, chacune renvoyant aux temps de réponse moyens par condition : Main Droite-P1, Main Droite-P2, Main Droite-P3 et Main Droite-P4 ; ainsi que Main Gauche-P1, Main Gauche-P2, Main Gauche-P3 et Main Gauche-P4. L'analyse de variance a tout d'abord mis en évidence un effet significatif de la quantité de sondes, indiquant des temps de réponse significativement plus lents en condition Mono-cible qu'en condition Multi-cibles ($F(1, 127) = 45.73, p < .001, \eta^2_p = .265$). Une interaction significative entre la position de l'item et la quantité de sondes a également été identifiée, montrant une augmentation des temps de réponse en fonction de la position en condition Multi-cible,

tandis qu'une régression des temps de réponse en fonction de la position était observée en condition Mono-cible ($F(3, 381) = 9.52, p < .001, \eta_p^2 = .070$). De manière plus significative pour notre étude, l'interaction Main × Position caractéristique du SPoARC a pu être identifiée ($F(3, 381) = 7.23, p < .001, \eta_p^2 = .054$), suggérant la présence d'un effet de spatialisation sur l'ensemble de l'échantillon. En revanche, aucun de nos facteurs d'intérêt n'a interagi avec l'effet SPoARC, contrairement à nos hypothèses (voir le Tableau C.6 en Annexe C pour le détail de cette analyse).

3.2.3.3 Effet de spatialisation : Modèles linéaires mixtes généralisés

Ces premiers résultats ont été complétés à l'aide de modèles linéaires mixtes généralisés (GLMM) (Lo & Andrews, 2015). Premièrement, cette méthode permet d'éviter la transformation logarithmique des données, qui peut parfois poser question dans l'interprétation des effets, notamment dans le cadre d'une interaction (Lo & Andrews, 2015). Deuxièmement, les GLMM se basent sur l'analyse de données non agrégées (i.e., à l'échelle de l'essai), permettant de mieux tenir compte de l'effet de facteurs aléatoires sur la variable dépendante. Une telle démarche a par ailleurs déjà été éprouvée dans l'investigation d'un effet SPoARC (Guida et al., 2016, 2020c). Un test *fitDist* (bibliothèque *gamlss*) a été effectué dans R (R Core Team, 2023) pour estimer le type de distribution modélisant le mieux les temps de réponse winsorisés. Les résultats ont indiqué qu'une distribution inverse-gaussienne – également appelée distribution de Wald (Heathcote, 2004) – s'ajustait suffisamment bien aux données. Comme suggéré par Lo et Andrews (2015, mais voir aussi Ratcliff, 1993), une distribution inverse-gaussienne a donc été utilisée comme distribution de référence dans nos modèles.

Les quatre facteurs inclus dans l'analyse de variance présentée ci-haut ont été conservés comme facteurs d'intérêt dans nos modèles mixtes. Par ailleurs, le numéro de l'essai a également été intégré à l'analyse, dans le but de tenir compte d'un éventuel effet d'apprentissage ou de fatigue sur les temps de réponse. En condition Mono-cible, chaque essai a été codé de 1 à 60 pour chaque participant, contre une cotation allant de 1 à 32 pour la condition Multi-cibles. Le facteur sujet a été retenu comme première variable aléatoire dans nos modèles, afin de tenir compte de la structure répétée des données et de permettre à l'ordonnée à l'origine (ou *intercept*) de varier d'un participant à l'autre. Bien que nos analyses préliminaires n'aient pas montré de différence significative dans le taux de bonnes réponses associées aux différents fruits présentés lors de la phase de reconnaissance, l'item a tout de même été retenu comme deuxième facteur aléatoire, nous permettant de tenir compte d'une éventuelle variation du temps de réaction entre les différents stimuli. Une logique hiérarchique a été appliquée pour l'élaboration des différents modèles. Leur complexité a été progressivement renforcée, en ne simulant dans un premier temps que les effets des facteurs aléatoires sur la variable

dépendante (Guida et al., 2013, 2016). Un tout premier modèle incluant uniquement l'effet du facteur Sujet ($M0$) a été élaboré et considéré comme point de référence. Ce modèle a ensuite été enrichi, premièrement avec le facteur aléatoire Item ($M1$), suivi des différents facteurs d'intérêt, également inclus successivement, et pour lesquels seuls des effets principaux ont été modélisés ($M2$ à $M6$). Des modèles plus complexes ont ensuite été élaborés, en intégrant progressivement des effets d'interaction à deux facteurs ($M7$ à $M12$), puis à trois facteurs ($M13$ à $M16$), pour finir avec le modèle le plus complexe simulant l'interaction des quatre variables d'intérêt ($M17$). Bien que des hypothèses liées à l'interaction du numéro d'essai avec la spatialisation auraient pu être justifiées, elles n'ont pas été considérées comme cruciales pour l'analyse réalisée dans la présente étude (ces hypothèses sont par ailleurs abordées plus amplement dans le Chapitre 4). Le facteur Numéro d'Essai a donc été tenu hors des interactions, notamment pour optimiser le temps de convergence des modèles les plus complexes. Le Tableau 3.2 décrit les 17 modèles de cette analyse.

Tableau 3.2 – Modèles linéaires mixtes généralisés implémentés pour l'Expérience 5

$M0$	⟵ TR ∼ (1|S)
$M1$	⟵ TR ∼ (1|I) + (1|S)
$M2$	⟵ TR ∼ Essai + (1|I) + (1|S)
$M3$	⟵ TR ∼ Position + Essai + (1|I) + (1|S)
$M4$	⟵ TR ∼ Position + Main + Essai + (1|I) + (1|S)
$M5$	⟵ TR ∼ Position + Main + Type de stimulus + Essai + (1|I) + (1|S)
$M6$	⟵ TR ∼ Position + Main + Type de stimulus + Quantité de sondes + Essai + (1|I) + (1|S)
$M7$	⟵ TR ∼ Position × Main + Type de stimulus + Quantité de sondes + Essai + (1|I) + (1|S)
$M8$	⟵ TR ∼ Position × Type de stimulus + Main + Quantité de sondes + Essai + (1|I) + (1|S)
$M9$	⟵ TR ∼ Position × Quantité de sondes + Main + Type de stimulus + Essai + (1|I) + (1|S)
$M10$	⟵ TR ∼ Main × Type de stimulus + Quantité de sondes + Position + Essai + (1|I) + (1|S)
$M11$	⟵ TR ∼ Main × Quantité de sondes + Type de stimulus + Position + Essai + (1|I) + (1|S)
$M12$	⟵ TR ∼ Type de stimulus × Quantité de sondes + Main + Position + Essai + (1|I) + (1|S)
$M13$	⟵ TR ∼ Position × Main × Type de stimulus + Quantité de sondes + Essai + (1|I) + (1|S)
$M14$	⟵ TR ∼ Position × Main × Quantité de sondes + Type de stimulus + Essai + (1|I) + (1|S)
$M15$	⟵ TR ∼ Position × Quantité de sondes × Type de stimulus + Main + Essai + (1|I) + (1|S)
$M16$	⟵ TR ∼ Main × Type de stimulus × Quantité de sondes + Position + Essai + (1|I) + (1|S)
$M17$	⟵ TR ∼ Position × Main × Type de stimulus × Quantité de sondes + Essai + (1|I) + (1|S)

Note. TR = Temps de Réponse, Position = Position de l'item dans la séquence, Main = Main de réponse, Essai = Numéro de l'Essai, I = Item et S = Sujet. La ligne colorée correspond au modèle classé premier par l'AIC.

Chaque modèle a été classé en utilisant la fonction *aictab* de la bibliothèque *AICcmodvag* dans R (R Core Team, 2023). Les modèles ont été comparés sur la base de leur critère d'information d'Akaike (*Akaike Information Criterion* en anglais, ou AIC ; voir Akaike, 1974 ; Burnham & Anderson, 2004 ; Burnham et al., 2011). Ce critère permet de choisir le modèle le plus parcimonieux en fonction de sa vraisemblance, en tenant compte du nombre de paramètres à estimer, le meilleur modèle étant celui ayant la plus faible valeur d'AIC. Cet indice a été préféré au critère d'information bayésien (*Bayesian Information Criterion* en anglais, ou BIC) car ce dernier tend à sélectionner des modèles trop parcimonieux dans le cas de données issues d'un échantillon restreint. Or, même si la parcimonie est généralement souhaitable, un modèle trop parcimonieux

n'est pas nécessairement celui qui généralise le mieux à l'échelle de la population (Burnham & Anderson, 2004 ; Pitt & Myung, 2002), sans compter le risque accru d'omission de détection d'effets dans le cadre exploratoire. Pour chaque modèle, le Tableau 3.3 reporte une valeur corrigée d'AIC (soit l'AICc, utilisée pour de petits échantillons ou lorsque beaucoup de paramètres sont à prendre en compte). À cette valeur est associée un delta AICc, calculé par la formule suivante :

$$\Delta AICc = AICc_i - AICc_{min}$$

et qui indique la différence d'AICc entre un modèle donné ($AICc_i$) et le modèle classé en première position ($AICc_{min}$, Burnham & Anderson, 2004). L'AICcWt, également reporté dans le Tableau 3.3, renvoie quant à lui au poids d'un modèle parmi l'ensemble des modèles classés, et peut être interprété comme la probabilité qu'un modèle soit le plus ajusté aux données (Burnham et al., 2011).

Tableau 3.3 – Classement des modèles linéaires mixtes généralisés implémentés pour l'Expérience 5 selon leur nombre de paramètres (K), et leurs valeurs AICc, delta AICc et AICcWt

Modèles	K	$AICc$	$\Delta AICc$	$AICcWt$
$M14$	13	133290.8	0	0.82
$M9$	10	133295.2	4.42	0.09
$M17$	20	133296.1	5.31	0.06
$M15$	13	133297.0	6.24	0.04
$M7$	10	133308.9	18.13	0.00
$M13$	13	133311.0	20.23	0.00
$M8$	10	133316.3	25.49	0.00
$M6$	9	133316.4	25.65	0.00
$M10$	10	133316.9	26.17	0.00
$M12$	10	133318.1	27.29	0.00
$M11$	10	133318.4	27.63	0.00
$M16$	13	133319.7	28.94	0.00
$M4$	7	133321.7	30.97	0.00
$M5$	8	133322.2	31.41	0.00
$M3$	6	133325.2	34.48	0.00
$M2$	5	133336.5	45.71	0.00
$M1$	4	133339.2	48.39	0.00
$M0$	3	133386.6	95.83	0.00

Note. La différence de couleur indique le modèle le plus parcimonieux. Pour une description de chaque modèle, voir le Tableau 3.2.

Le modèle classé en première position ($M14$) a été retenu comme s'ajustant le mieux aux données de cette étude. Ce modèle tenait compte de l'interaction principale attendue sous l'hypothèse d'un SPoARC, à savoir l'interaction Main × Position. Par ailleurs, le modèle $M14$ simulait également un effet de la quantité de sondes sur la spatialisation. Un test de χ^2 a été conduit pour estimer si une différence significative pouvait être détectée entre l'indice de vraisemblance du premier modèle et celui du modèle classé en deuxième position (soit le modèle $M9$, simulant quant à lui une

interaction entre le facteur Position et le facteur Quantité de sondes uniquement). Les résultats ont indiqué une différence significative entre les deux modèles ($\chi^2(3) = 10.44$, $p = .015$).

Une analyse détaillée du modèle $M14$ a permis de confirmer l'effet significatif de la quantité de sondes sur les temps de réponse (m_{Mono} = 871 ms, ET = 286 ms ; m_{Multi} = 705 ms, ET = 266 ms) déjà mis en évidence par le biais de l'ANOVA (voir le Tableau 3.4 pour les statistiques relatives à cet effet)[7]. Des facteurs n'ayant pas atteint le seuil de significativité dans la première analyse se sont avérés être significatifs dans le modèle mixte. Les résultats ont, par exemple, montré un effet de la position sur les temps de réponse, avec des temps plus rapides pour le premier item en moyenne, et des temps plus longs pour les items suivants (m_{P1} = 718 ms, ET = 258 ms ; m_{P2} = 735 ms, ET = 284 ms ; m_{P3} = 731 ms, ET = 275 ms et m_{P4} = 753 ms, ET = 288 ms ; $t(9926) = -6.83$, $p =< .001, \beta Std. = -31.33$). Ensuite, un effet du type de stimulus a pu être identifié, révélant des temps de réponse significativement plus rapides pour la reconnaissance de mots, en comparaison aux images (m_{Mot} = 699 ms, ET = 245 ms ; m_{Image} = 769 ms, ET = 301 ms, $t(9926) = -4.66$, $p < .001, \beta Std. = -49.43$). Enfin, les résultats ont également indiqué que les participants tendaient à répondre plus vite de leur main gauche que de leur main droite (m_{Gauche} = 730 ms, ET = 281 ms, m_{Droite} = 739 ms, ET = 273 ms, $t(9926) = -9.20$, $p < .001, \beta Std. = -12.40$).

Tableau 3.4 – Résultats du modèle $M14$ de l'Expérience 5

Effet	Estimation	ES	t	p	$\beta Std.$
Intercept	1024.46	12.77	80.21	< .001	-
Position	-27.98	4.10	-6.83	< .001	-31.33
Main	-66.43	7.22	-9.20	< .001	-12.40
Quantité de sondes	-215.80	10.46	-20.63	< .001	-133.89
Type de stimulus	-49.41	10.61	4.66	< .001	-49.43
Essai	-0.40	0.18	-2.18	.029	-4.94
Position × Main	21.61	4.08	5.30	< .001	24.18
Position × Quantité de sondes	32.76	4.47	7.33	< .001	36.68
Main × Quantité de sondes	35.34	7.36	4.80	< .001	3.79
Position × Main × Quantité de sondes	-12.62	4.42	-2.85	.004	-14.11

Note. ES = Erreur Standard, Position = Position de l'item dans la séquence, Main = Main de réponse et Essai = Numéro de l'Essai.

Un effet d'interaction significatif entre la position de l'item dans la séquence et la main de réponse a ensuite été observé, suggérant l'existence d'un effet de spatialisation au sein de l'échantillon ($t(9926) = 5.30$, $p < .001, \beta Std. = 24.18$). Une augmentation des temps de réponse de la main gauche en fonction de la position de l'item a pu être observée (m_{G-P1} = 698 ms, ET = 251 ms ; m_{G-P2} = 735 ms, ET = 288 ms ; m_{G-P3}

[7] Des temps de réponse significativement plus longs en condition Mono-cible ont également été observés en ne prenant en compte que la première sonde parmi la série de huit dans la condition Multi-cibles ($t(2798) = -9.22$, $p < .001, \beta Std. = -85.34$).

= 731 ms, ET = 283 ms et m_{G-P4} = 755 ms, ET = 296 ms) tandis que les temps de réponse de la main droite tendaient à être relativement similaires entre les différentes positions (m_{D-P1} = 738 ms, ET = 264 ms ; m_{D-P2} = 735 ms, ET = 280 ms ; m_{D-P3} = 732 ms, ET = 266 ms et m_{D-P4} = 750 ms, ET = 280 ms, voir la Figure C.4 en Annexe C pour un aperçu des pentes obtenues pour chaque main sur l'échantillon global). L'interaction significative précédemment identifiée entre les facteurs Position et Quantité de sondes a également pu être confirmée par cette analyse, les temps de réponse tendant à diminuer au fil des positions en condition Mono-cible ($m_{Mono-P1}$ = 882 ms, ET = 274 ms ; $m_{Mono-P2}$ = 894 ms, ET = 296 ms ; $m_{Mono-P3}$ = 857 ms, ET = 276 ms et $m_{Mono-P4}$ = 856 ms, ET = 298 ms) et à augmenter au fil des positions en condition Multi-cibles ($m_{Multi-P1}$ = 681 ms, ET = 240 ms ; $m_{Multi-P2}$ = 708 ms, ET = 273 ms ; $m_{Multi-P3}$ = 701 ms, ET = 266 ms et $m_{Multi-P4}$ = 728 ms, ET = 281 ms). De plus, une interaction significative entre la main de réponse et la quantité de sondes a été observée, traduisant notamment une plus grande différence de temps de réaction entre main gauche et main droite en condition Multi-cibles ($m_{G-Multi}$ = 700 ms, ET = 269 ms ; $m_{D-Multi}$ = 710 ms, ET = 262 ms) par rapport à la condition Mono-cible (m_{G-Mono} = 868 ms, ET = 292 ms ; m_{D-Mono} = 873 ms, ET = 279 ms). Les statistiques relatives à ces deux effets sont reportées dans le Tableau 3.4.

L'un des résultats clés de cette étude est la mise en évidence d'une interaction significative entre la position de l'item, la main de réponse et la quantité de sondes après la séquence ($t(9926) = -2.85$, $p = .004$, $\beta Std. = -14.11$). De tels résultats viennent suggérer que la spatialisation a pu effectivement être modulée par la quantité de sondes présentées aux participants lors de la phase de reconnaissance. La Figure 3.3 (et le Tableau C.7 en Annexe C) rendent compte des temps de réponse pour chacune des mains et pour chaque position dans l'une et l'autre des conditions expérimentales. En condition Multi-cibles, le pattern d'interaction révèle une augmentation des temps de la main gauche – mais aussi de la main droite – en fonction de la position de l'item dans la séquence ; avec une différence entre les deux mains principalement observée pour le premier item. La condition Mono-cible a quant à elle généré une plus nette diminution des temps de la main droite au fil des positions, ainsi qu'une plus grande différence entre main gauche et main droite pour la première position. Il semble en résulter un meilleur équilibre dans les patterns de réponses observés en condition Mono-cible, comparé à la condition Multi-cibles, avec un SPoARC plus symétrique dans la première condition (i.e., plus symétrique dans le sens où, sous l'hypothèse d'un tableau mental, les temps de réponse de la main droite sont censés diminuer de gauche à droite, et inversement pour la main gauche, et dans le sens où l'on pourrait s'attendre à un croisement des droites de régression au niveau de la position médiane).

Des modèles mixtes généralisés complémentaires ont également été conduits pour comparer la condition Mono-cible à la condition Multi-cibles en ne prenant en compte

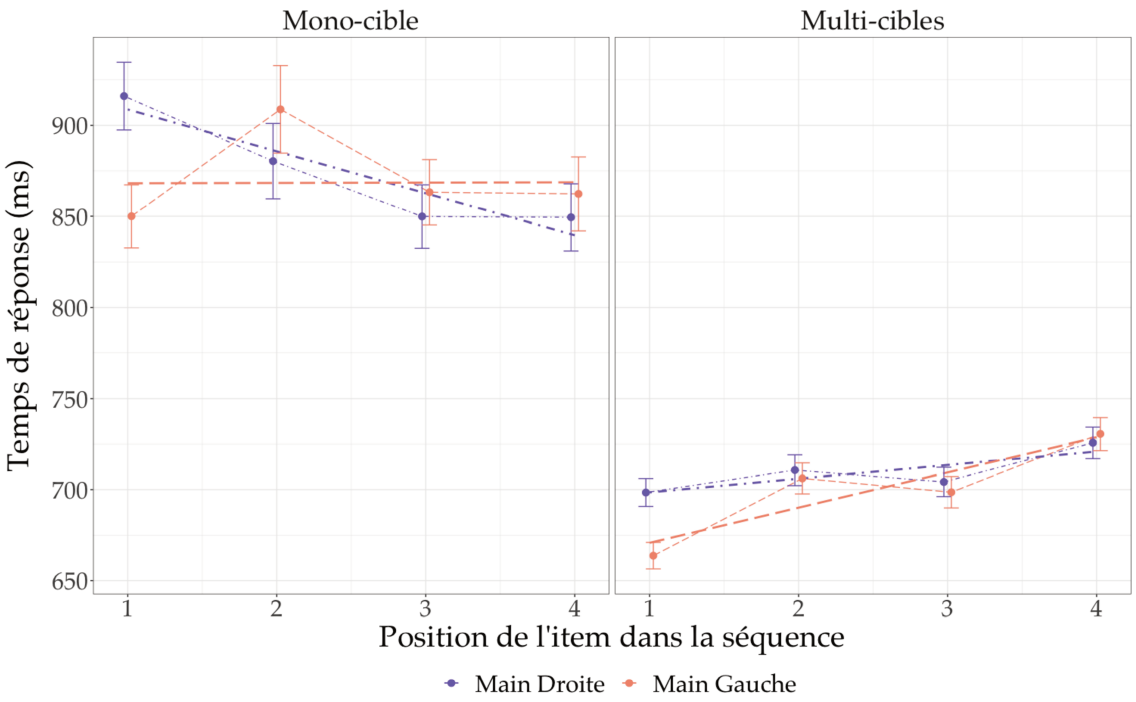


FIGURE 3.3 – Moyenne et régressions linéaire des temps réponse (exprimés en millisecondes) en fonction de la position de l'item dans la séquence, de la main de réponse et de la quantité de sondes pour l'Expérience 5. *Note.* Les barres d'erreur correspondent à ± 1 Erreur Standard.

que la première sonde présentée pendant la phase de reconnaissance dans cette condition. Parmi les 17 modèles implémentés, le modèle rendant le plus fidèlement compte des données était similaire à celui identifié dans l'analyse globale ($M14_{S1}$ $\longleftarrow$ TR $\sim$ Position $\times$ Main $\times$ Quantité de sondes + Type de stimulus + Essai + $(1|I)$ + $(1|S)$, voir le Tableau C.8 en Annexe C). Même si les modèles classés premiers étaient similaires entre les deux analyses, une différence dans les patterns de résultats a été observée, étant donné que l'interaction Position $\times$ Main $\times$ Quantité de sondes n'était plus significative. Cette analyse restreinte à la première sonde étant basée sur une quantité plus faible de données dans la condition Multi-cibles (i.e., 16 items cibles contre 30 dans la condition Mono-cible), il ne peut pas être totalement exclu qu'une puissance statistique insuffisante soit à l'origine de cette absence de significativité. Néanmoins, cette comparaison permet de préciser les mécanismes à l'œuvre dans la réduction du SPoARC. En effet, l'analyse globale – tenant compte de l'ensemble des sondes testées lors de la phase de reconnaissance – ne permettait pas de distinguer l'influence d'une interférence *rétroactive*, où le traitement successif de différents fruits au moment du test perturberait la rétention de la séquence tout juste mémorisée ; de celle d'une interférence *proactive*, où l'accumulation des items déjà traités entraverait la mémorisation des séquences suivantes. En montrant que le SPoARC ne tend pas à différer entre les conditions Mono-cible et Multi-cibles lorsque seul le premier test est considéré, alors qu'une telle différence devient visible en tenant compte de l'ensemble des cibles testées lors de la phase de reconnaissance, cette analyse complémentaire tend à conforter l'idée qu'une interférence rétroactive puisse entraver la spatialisation. Autrement dit, la réduction du SPoARC ne résulterait pas du fait que les participants de la condition Multi-cibles aient globalement traité davantage de fruits que ceux de la condition Mono-cible – 256 fruits contre 60 dans la phase de reconnaissance, soit environ quatre fois plus – mais bien du traitement successif des items au moment du test, chaque nouvelle sonde venant fragiliser le maintien de la séquence initialement encodée.

3.2.3.4 Effet de spatialisation : régression linéaire

Pour compléter l'analyse effectuée sur les temps de réponse, les patterns de spatialisation précédemment identifiés ont été explorés par le biais d'une régression linéaire à mesures répétées (Lorch & Myers, 1990). Un modèle linéaire mixte a été élaboré, en prenant le facteur Position comme variable prédictive et le facteur Sujet comme variable aléatoire. Une nouvelle variable dépendante a été dérivée des temps de réponse winsorisés pour cette analyse : pour chaque participant, une différence de temps de réponse moyenne entre les deux mains de réponse a été calculée pour chaque position par le biais de la formule suivante :

$$d_{TR} = TR_{main\ droite} - TR_{main\ gauche}$$

À l'échelle individuelle, quatre valeurs ont ainsi été extraites, représentant la différence des temps de réponse entre les deux mains pour les positions 1 (d_{TR-P1}), 2 (d_{TR-P2}), 3 (d_{TR-P3}) et 4 (d_{TR-P4}). Cette différence étant systématiquement calculée en soustrayant les temps de la main droite aux temps de la main gauche, une d_{TR} *positive* indique des temps de réaction plus rapides de la main gauche, tandis qu'une d_{TR} *négative* rend compte d'un avantage pour la main droite. Sous l'hypothèse d'une spatialisation orientée de gauche à droite pour cette population, des d_{TR} positives devraient être observées pour les premières positions, tandis que les dernières positions devraient être associées à des d_{TR} plutôt négatives. En résulterait alors un coefficient de régression négatif, modélisant la diminution moyenne des d_{TR} pour chaque unité du facteur position. Pour attester de la présence d'un SPoARC, ce coefficient de régression doit différer significativement de zéro.

Une première analyse a été conduite pour l'ensemble de l'échantillon, révélant un effet global de la position de l'item sur la différence des temps de réponse entre la main droite et la main gauche. Toute condition confondue, les d_{TR} tendaient à diminuer de 16.37 ms en moyenne pour chaque unité de la variable prédictive ($t(392) = -3.34$, $p < .001$, $\beta Std. = -0.12$, $d_{TR-P1} = 48.06$ ms, $ET = 156$ ms ; $d_{TR-P2} = -11.64$ ms, $ET = 159$ ms ; $d_{TR-P3} = -2.92$ ms, $ET = 134$ ms et $d_{TR-P4} = -9.41$ ms, $ET = 157$ ms). Un SPoARC significatif et orienté de gauche à droite a donc pu être mis en évidence, comme le montre la Figure C.5 en Annexe C, qui illustre la tendance générale pour l'ensemble des participants. Une analyse différentielle a ensuite été conduite pour rendre compte des pentes de régression relatives à la condition Mono-cible et à la condition Multi-cibles. Les résultats ont indiqué que les coefficients des deux pentes différaient significativement de zéro ($\beta_{Mono} = -21.47$, $t(188) = -2.29$, $p = .023$, $\beta Std. = -0.12$; $\beta_{Multi} = -11.65$, $t(203) = -3.18$, $p = .002$, $\beta Std. = -0.13$). Malgré une taille d'effet légèrement plus élevée en condition Multi-cibles, les résultats indiquent néanmoins un coefficient de régression plus important pour la procédure Mono-cible, attestant d'un effet plus marqué du facteur Position dans cette condition[8]. Dans l'analyse des patterns de spatialisation observés entre les deux conditions, la pente obtenue en Mono-cible se caractérise par une forte différence entre le premier d_{TR} et les suivants, une différence qui s'est avérée être de moins grande envergure en condition Multi-cibles (voir la Figure 3.4). Des analyses ont également été menées pour distinguer les pentes entre la condition Image et la condition Mot, montrant que ces deux types de stimulus ont conduit à des effets SPoARC d'intensités comparables ($\beta_{Image} = -17.39$, $t(197) =$

[8] À la différence, une analyse ne se limitant qu'aux données de la première sonde dans la condition Multi-cibles a mis en évidence un coefficient de corrélation comparable à celui de la condition Mono-cible ($\beta_{Multi-Cible1} = -19.47$), bien qu'il n'ait que marginalement différé de zéro ($t(198.12) = -1.73$, $p = .085$, $\beta Std. = -0.10$). Cette analyse indique que la différence d'intensité entre les deux conditions pourrait effectivement être imputée à la succession de différentes cibles en condition Multi-cibles, engendrant de l'interférence rétroactive sur le maintien de la séquence testée.

-2.29, $p = .023$, $\beta Std. = -0.12$; $\beta_{Mot} = -15.33$, $t(194) = -2.48$, $p = .014$, $\beta Std. = -0.12$, voir la Figure C.6 en Annexe C). Les d_{TR} relatives à ces analyses sont reportées dans le Tableau C.9 en Annexe C.

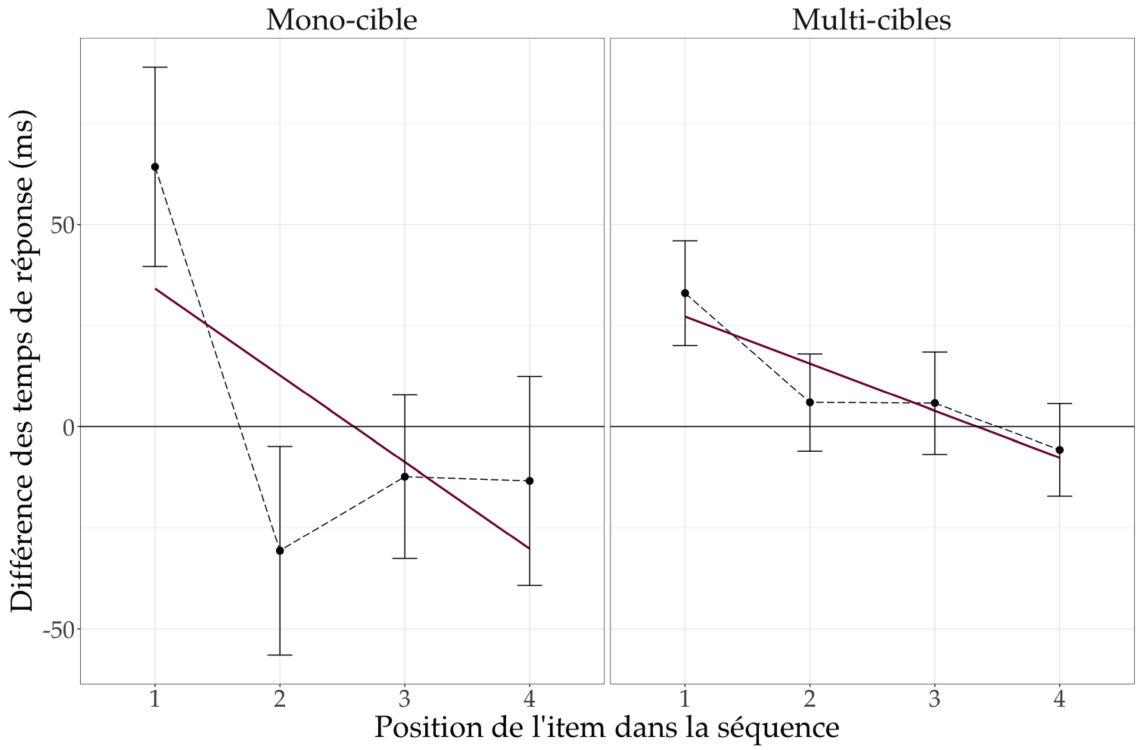


Figure 3.4 – Régression linéaire de la différence des temps de réponse moyens (d_{TR}) entre main droite et main gauche en fonction de la position de l'item dans la séquence mémorisée et de la quantité de sondes dans l'Expérience 5. *Note.* La d_{TR} a été obtenue en soustrayant les temps de réponse de la main gauche aux temps de réponse de la main droite pour chaque position ($d_{TR} = TR_{\text{main droite}} - TR_{\text{main gauche}}$). Une d_{TR} positive, retrouvée par exemple en position 1, indique des temps de réponse plus rapides de la main gauche. Une d_{TR} négative, observée par exemple en position 4, indique quant à elle des temps de réponse plus rapides de la main droite. La figure a été réalisée sur les données agrégées par position et par sujet, et les barres d'erreur correspondent à $\pm$ 1 Erreur Standard.

3.2.3.5 Bootstrap et analyse log-linéaire

Pour compléter les analyses réalisées au niveau du groupe, une méthode bootstrap (développée par Cipora et al., 2019 dans le cadre du SNARC) a été appliquée pour apprécier l'effet SPoARC à l'échelle individuelle. Cette méthode présente l'avantage d'obtenir des résultats indépendants des caractéristiques globales de l'échantillon, dans la mesure où elle s'appuie sur le calcul d'intervalles de confiance propres à chaque pente individuelle (l'estimation reposant ainsi uniquement sur la stabilité des réponses d'un même participant). Les bornes de confiance des pentes empiriques (i.e., des pentes

calculées à partir des données brutes) ont été estimées sur la base de rééchantillonnages des temps de réponse collectés durant la tâche pour chaque participant. Deux approches peuvent être considérées pour le calcul de ces intervalles, à savoir l'approche *H1* et l'approche *H0*. Dans le cadre de cette thèse, l'approche choisie sera la méthode *H1*, dans la mesure où elle demeure la plus couramment reportée dans la littérature (Guida et al., 2020c ; van Dijck et al., 2020, 2022), mais aussi car elle tend à produire les mêmes résultats que l'approche *H0*.

L'approche *H1* consiste en un tirage aléatoire – avec remise – de n temps de réponse pour chaque participant ; n correspondant aux nombres de données récoltées dans chaque cellule du plan expérimental (i.e., pour chaque Position × Main). Un point clé dans cette méthode réside dans le fait que les temps de réponse collectés pour chaque position et chaque main de réponse sont réassignés à ces mêmes conditions lors du tirage. Par exemple, des temps de réponse collectés lorsque le participant identifiait des items placés en première position de sa main gauche resteront associés à cette condition expérimentale lors du rééchantillonnage. Cependant, le tirage étant effectué avec remise, il devient alors probable qu'un même temps de réponse soit sélectionné à plusieurs reprises, tandis qu'un autre temps de réponse pourra ne pas être retenu dans l'échantillon final, résultant en une moyenne différente de celle observée empiriquement. De manière critique, si cette moyenne a été influencée par un temps de réponse aberrant lors de la tâche, la moyenne calculée par bootstrap pourra être plus représentative du pattern de réponse réellement observé, dans la mesure où ce temps de réponse aberrant pourrait ne pas être sélectionné lors du tirage. Considérons par exemple un participant ayant répondu quatre fois à un premier item de sa main gauche, et ayant présenté des réponses rapides – et donc congruentes avec une spatialisation gauche-droite – dans 75% des cas (e.g., 500 ms, 600 ms, 550 ms, contre un temps aberrant de 2000 ms) ; la moyenne empirique pour la condition main-gauche/position 1 sera alors de 912.5 ms. Supposons à présent que le tirage bootstrap écarte ce temps de réponse aberrant du jeu de données final (résultant en la sélection des temps de 500 ms, 600 ms, 550 ms, puis de 600 ms à nouveau), la nouvelle moyenne sera alors de 562.5 ms, représentant plus fidèlement la majorité des temps de réponse observés dans cette condition. À partir des nouvelles moyennes, la différence entre main droite et main gauche est ensuite calculée pour chaque position, pour résulter en l'estimation d'une nouvelle pente de spatialisation. Ce processus est ensuite répété un grand nombre de fois, le nombre de tirages étant communément fixé à 5000 dans la plupart des études (Cipora et al., 2019 ; Guida et al., 2020c ; van Dijck et al., 2020, 2022). À partir de ces 5000 pentes de spatialisation, un intervalle de confiance est déterminé en sélectionnant les valeurs situées à des percentiles donnés au sein de la distribution. Pour faciliter l'interprétation de nos résultats au regard de travaux antérieurs, nous avons choisi d'appliquer un intervalle de confiance de 80% (utilisé par exemple dans les études de

Guida et al., 2020c ; ou de van Dijck et al., 2020), correspondant aux coefficients situés au 10^{me} et au 90^{me} percentiles. Les participants pour qui cet intervalle ne contient pas la valeur zéro sont considérés comme présentant un SPoARC suffisamment fiable pour être catégorisés comme spatialiseurs – la polarité de leur pente empirique déterminant par ailleurs si l'effet s'oriente de gauche à droite (pente négative) ou de droite à gauche (pente positive). À l'inverse, la présence de la valeur zéro dans l'intervalle de confiance indique que l'effet aurait tout aussi bien pu ne pas être observé dans une large série de réplications expérimentales (i.e., 5000) si la distribution des réponses pour chaque Position × Main était restée inchangée. De ce fait, des participants dans ce cas de figure sont considérés comme non-spatialiseurs[9].

L'analyse bootstrap a révélé que 28% des participants (37 participants sur 131) pouvaient être catégorisés comme des spatialiseurs de manière fiable, leur intervalle de confiance ne comprenant pas le zéro[10]. Sur ces 37 participants, 29 présentaient une spatialisation orientée de gauche à droite (soit 22% de l'échantillon total), et huit présentaient une spatialisation inversée (soit 6% de l'échantillon). Un χ^2 d'ajustement a permis d'attester que la répartition des participants entre les différents types de spatialisation (Pente négative, Absence d'effet et Pente positive) différait significativement d'une répartition aléatoire ($\chi^2(2) = 92.08$, $p < .001$, W de Cohen $= 0.84$). Ces résultats sont présentés sur la Figure 3.5.

Une analyse log-linéaire a ensuite été conduite pour déterminer l'impact de nos facteurs d'intérêt sur la distribution de spatialiseurs gauche-droite, non-spatialiseurs et spatialiseurs inverses. Aucun effet significatif du facteur Quantité de sondes n'a pu être observé, les distributions entre les trois types de spatialisation tendant à être similaires entre les conditions Mono-cible (25% de spatialiseurs gauche-droite, 67% de non-spatialiseurs et 8% de spatialiseurs inverses) et Multi-cibles (19% de spatialiseurs gauche-droite, 77% de non-spatialiseurs et 4% de spatialiseurs inverses, $L(2) = 0.99$,

[9] Dans une toute autre logique, l'approche *H0* vise à déterminer dans quelle mesure les données collectées sont compatibles avec une absence totale d'effet. De la même manière que dans la démarche liée à *H1*, cette approche se base sur 5000 tirages aléatoires – avec remise – des temps de réponse des participants. Cependant, là où les temps de réponse sont échantillonnés pour chaque Position × Main dans la méthode précédemment décrite, seul le facteur Position est conservé dans la méthode *H0*. En d'autres termes, des temps de réponse associés aux positions 1 à 4 (auxquels correspondaient par ailleurs une main de réponse dans la tâche) sont redistribués aléatoirement aux conditions Gauche ou Droite à chaque permutation. Les coefficients de régression calculés à partir de ces données réassignées reflètent alors la pente attendue si l'effet du facteur Main était entièrement dû au hasard. Ainsi, la présence de la pente empirique à l'intérieur de l'intervalle de confiance *H0* indiquera que l'effet observé aurait pu être lié à des fluctuations aléatoires, remettant en question sa fiabilité. Les participants relevant de ce cas de figure seront alors catégorisés comme non-spatialiseurs. À l'inverse, une pente empirique située en dehors de cet intervalle témoigne d'un SPoARC suffisamment robuste pour ne pas pouvoir être répliqué sous l'hypothèse du hasard.

[10] La correspondance entre les méthodes *H0* et *H1* est attestée par une corrélation significative égale à $\rho = -.91$, $p < .001$, dans le cadre de cette étude).

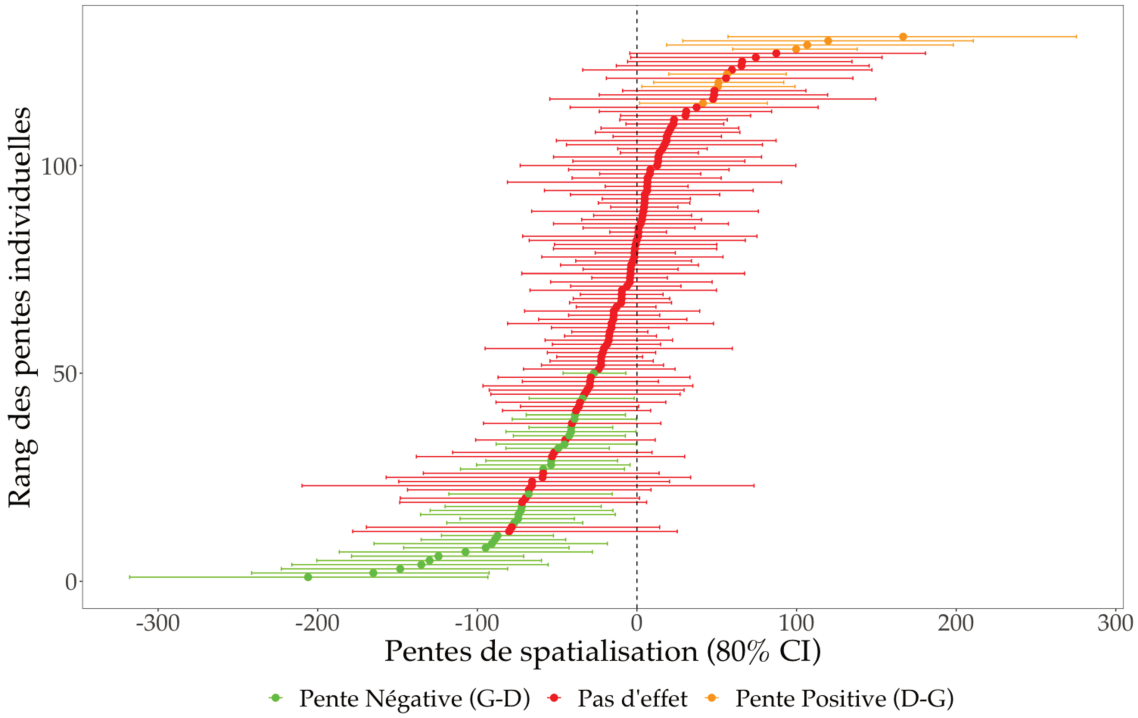


FIGURE 3.5 – Pentes empiriques et intervalles de confiance à 80% (calculées par bootstrap sur la base de 5000 rééchantillonnages) pour l'ensemble des participants de l'Expérience 5. *Note.* Chaque point représente la pente de régression d'un participant, et les segments rendent compte de l'intervalle à 80%. Un participant présente un effet SPoARC orienté de gauche à droite si sa pente est négative et que son intervalle de confiance ne contient pas la valeur zéro (données identifiées en vert sur le graphique). Un participant présente un effet de spatialisation orienté de droite à gauche si sa pente est positive et que l'intervalle de confiance ne contient pas la valeur zéro (données identifiées en orange sur le graphique). Si l'intervalle de confiance contient la valeur zéro, aucun effet de spatialisation n'est identifié (données représentées en rouge sur le graphique). L'ensemble de l'échantillon comporte 22% de participants spatialisant l'information de gauche à droite, 72% de non-spatialiseurs et 6% de participants spatialisant l'information de droite à gauche.

$p = .609$). Cette absence de différence identifiée ici semble indiquer que la modulation du SPoARC entre ces deux conditions réside davantage dans l'intensité de l'effet (comme montré dans les modèles mixtes et dans l'analyse de régression) plutôt que dans le nombre de participants ayant montré une spatialisation fiable. Le même pattern de résultats a été observé pour le type de stimulus, les conditions Image et Mot n'ayant pas conduit à des répartitions différentes entre les trois catégories (respectivement 21% et 23% de spatialiseurs gauche-droite, 71% et 72% de non-spatialiseurs ainsi que 8% et 5% de spatialiseurs droite-gauche, $L(2) = 0.21$, $p = .903$). Les Figures C.7 et C.8 en Annexe C illustrent les proportions obtenues dans chaque condition expérimentale. En accord avec les résultats des modèles mixtes, aucun effet d'interaction entre les deux facteurs n'a été identifié ($L(1) = 0.77$, $p = .381$, voir le tableau de contingence 3.5

pour un aperçu des effectifs et pourcentages observés dans chaque modalité). Le Tableau C.10 en Annexe C reporte l'intégralité des résultats de cette analyse log-linéaire.

Tableau 3.5 – Tableau de contingence reportant le nombre de participants (et le pourcentage correspondant) ayant une pente de régression significativement négative, significativement positive ou ne montrant pas d'effet suite à l'analyse bootstrap en fonction des quatre conditions expérimentales

Condition	Mono-cible			Multi-cibles		
	Négative	Absence d'effet	Positive	Négative	Absence d'effet	Positive
Image	7 (22%)	23 (72%)	2 (6%)	7 (21%)	24 (71%)	3 (9%)
Mot	9 (29%)	19 (61%)	3 (10%)	6 (18%)	28 (82%)	0 (0%)

3.2.4 Discussion

Afin d'identifier les facteurs susceptibles de générer un effet SPoARC de forte intensité, cette étude a manipulé conjointement la quantité de sondes présentées lors de la phase de reconnaissance (une seule *vs.* plusieurs sondes) ainsi que le type de stimulus utilisé (image *vs.* mot) dans le cadre d'une tâche classique de spatialisation. Nous avions émis l'hypothèse qu'un effet plus marqué serait détecté chez les participants ne devant traiter qu'une seule sonde après mémorisation, en comparaison à des participants testés sur une série de huit sondes successives. Notre seconde prédiction anticipait une différence entre le traitement de stimuli lexicaux et de stimuli imagés, ces derniers pouvant favoriser la visualisation des items au sein du tableau mental supposé sous-tendre les associations spatio-positionnelles observées en mémoire de travail (Abrahamse et al., 2014, 2017). En facilitant ainsi la visualisation des éléments codés en mémoire, nous pensions que l'utilisation d'images aboutirait à une spatialisation plus saillante. Alors que nos résultats tendent à confirmer nos attentes concernant la quantité de sondes, notre étude n'a néanmoins pas permis de mettre en évidence une variation de l'effet selon le type de stimulus utilisé.

L'identification d'un SPoARC significatif dans les conditions Image et Mot de la présente étude s'aligne avec des travaux ayant précédemment mis en évidence cet effet par le biais d'items lexicaux ou imagés à forte concrétude (Ginsburg et al., 2017 ; Guida et al., 2018a ; van Dijck & Fias, 2011 ; Zhou et al., 2019, 2021). Néanmoins, notre étude ne tend pas à favoriser un type de stimulus plutôt qu'un autre dans la détection du SPoARC, ce qui est en contradiction avec le résultat de Previtali et al. (2010), qui ont identifié une pente de spatialisation plus marquée suite à la mémorisation d'images concrètes, en comparaison à des mots désignant les mêmes concepts.

Pourtant, il convient ici de noter l'existence d'une différence tangible entre nos deux protocoles : là où la tâche utilisée par Previtali et al. (2010) impliquait le traitement d'une série d'items (i.e., arc, tente, pomme, train, chaise, rose, phare, chat et palmier), cette série avait été sur-apprise et rappelée de nombreuses fois par les participants avant que la tâche visant à mesurer la spatialisation ne leur soit proposée. Ainsi, à la différence d'être temporairement encodée et traitée en mémoire de travail comme dans notre tâche (et comme dans la quasi-totalité des études portant sur le SPoARC), le matériel était stocké en mémoire à long terme dans l'étude de Previtali et al. (2010). Cette différence entre études, couplée à une longueur de séquence excédant le nombre d'items généralement utilisés dans la littérature (i.e., 9 items au lieu de 4 ou 5), rend délicate la comparaison directe entre nos deux résultats. Dans le cas d'associations entre ordre et espace émergeant en mémoire de travail, l'utilisation d'items présentant des caractéristiques visuelles saillantes ne semble pas faciliter l'apparition de l'effet. Ce résultat pose la question du rôle que joue la visualisation et l'imagerie mentale dans la spatialisation.

Là où aucun effet du type de stimulus n'a pu être observé dans cette étude, nos manipulations expérimentales ont néanmoins mis en évidence l'influence du nombre de sondes sur l'émergence de la spatialisation. En accord avec nos hypothèses, nos résultats indiquent qu'il est préférable de ne présenter qu'une seule sonde plutôt qu'une série de sondes successives pour mieux détecter l'effet SPoARC. Deux principales hypothèses peuvent être avancées pour rendre compte d'une plus faible spatialisation dans la condition Multi-cibles. La première envisage que les activations répétées de la séquence dans cette condition aient pu induire une forme de consolidation de l'information maintenue en mémoire, consolidation que nous pensons susceptible d'atténuer le SPoARC. En effet, nous proposons ici que l'utilisation de sondes successives aurait pu amener les participants à scanner la séquence mémorisée autant de fois qu'ils ont été testés pendant la phase de reconnaissance. D'une part, il peut être avancé que ces scans répétitifs puissent aboutir à une plus grande stabilité de la trace mnésique, favorisant ainsi la récupération des items – comme le suggèrent les effets de tests (voir par exemple Roediger & Karpicke, 2006). Cependant, ces scans successifs auraient également pu impacter la manière dont les positions de ces items sont codées en mémoire.

Une première interprétation liée aux scans successifs est que parcourir les items de multiples fois aurait pu favoriser un codage unifié de la séquence, en renforçant les liens inter-items qui la composent et en aboutissant à la formation d'un chunk en mémoire (Page & Norris, 2009). L'encodage de la séquence sous forme d'un seul chunk pourrait alors nuire à la préservation de l'identité positionnelle des différents items, et en cascade, des coordonnées spatiales distinctives qui leur étaient initialement associées (une hypothèse qui sera plus amplement développée dans le Chapitre 4). De ce phénomène résulterait alors un SPoARC de moins grande envergure, tel que celui

mis en évidence dans notre étude.

Une seconde interprétation liée aux scans successifs concerne le poids de l'interférence de sortie, que nous avions pointée comme une cause possible de l'atténuation de la spatialisation. Comme évoqué dans l'introduction de cette étude, l'interférence de sortie renvoie à la diminution progressive des performances en mémoire à mesure que des tests se succèdent (voir par exemple Annis et al., 2013 ; Clark & Gronlund, 1996 ; Criss et al., 2011 ; Humphreys et al., 1989). Dans ce phénomène, deux sources d'interférence peuvent être identifiées. Le premier type d'interférence renvoie à ce que Criss et al. (2011) appellent « l'interférence liée à l'item », et qui touche à toutes les caractéristiques visuelles, phonologiques ou sémantiques des informations traitées durant la tâche. Au moment du test, ce sont ces caractéristiques que l'individu doit identifier comme appartenant ou non à la liste précédemment encodée. Là où les caractéristiques des items de la liste elle-même peuvent être source de compétition au moment du test (par exemple, « banane » – item mémorisé – et « citron » – item leurre dans la série de sondes – partagent la même couleur, ce qui peut pousser le participant à identifier à tort le citron comme faisant partie de la série), les caractéristiques des sondes elles-mêmes peuvent faire l'objet d'une interférence. Pour cause, chaque sonde traitée au moment du test va laisser sa propre trace en mémoire, rendant de plus en plus difficile la dissociation entre les caractéristiques des items présents dans la séquence mémorisée et celles des items précédemment rencontrés dans la série de sondes.

De manière plus cruciale pour la spatialisation, Criss et al. (2011) proposent que l'interférence peut également opérer par l'intermédiaire de l'information contextuelle. Le contexte, dans ce cadre, peut notamment renvoyer à un paramètre ayant été associé à l'information mémorisée, comme par exemple une coordonnée spatiale indiquant sa position au sein de la séquence. Au moment du test, la réactivation successive d'informations contextuelles différentes, qui plus est dans un ordre aléatoire (le participant devant par exemple juger du premier item, associé à la gauche, puis du dernier, associé à la droite, suivi du deuxième, etc.), peut diminuer la robustesse de la représentation spatiale en mémoire, conduisant à un SPoARC de plus faible intensité. De plus, le codage positionnel des items au sein de la série de sondes peut également générer de nouvelles associations contextuelles qui pourront entrer en compétition avec celles déjà établies pour la séquence encodée. Par exemple, le marqueur « droit » associé à un item placé en dernière position dans la séquence initiale pourrait entrer en compétition avec un marqueur « gauche » si cet item figurait parmi les premiers de la série de sondes. Cette double source d'interférence (liée à l'item et liée au contexte) causée par l'accumulation de sondes au moment du test n'est pas présente dans la condition Mono-cible, dans laquelle chaque séquence n'est testée que par une seule sonde.

Parmi les deux hypothèses proposées pour expliquer une diminution de la spatialisation en condition Multi-cibles, l'hypothèse de l'interférence semble trouver un appui dans nos résultats. Sous l'hypothèse du chunking, supposant une consolidation de la séquence et un renforcement de la trace mnésique, il aurait été attendu une augmentation de la performance et une diminution des temps de réponse au fil des tests. De prime abord, cette diminution des temps de réponse semble visible dans nos résultats, comme l'atteste une corrélation négative entre les temps de réponse et le rang de la sonde ($\rho = -.20$, $p < .001$). Toutefois, cette corrélation s'explique principalement par une différence entre la première sonde et les suivantes, l'effet n'étant plus significatif en tenant compte des positions deux à huit ($\rho = -.06$, $p = .159$). À la différence, une corrélation négative entre le taux de bonne réponse et le rang de la sonde a pu être observée, montrant que les participants tendaient à commettre davantage d'erreurs au fil des tests, en accord avec l'hypothèse d'interférence ($\rho = -.15$, $p < .001$). À la différence des corrélations relatives aux temps de réponse, cette diminution était toujours visible après exclusion de la première sonde ($\rho = -.11$, $p = .013$), confirmant l'effet préjudiciable de la succession des tests sur la précision des réponses.

En définitive, cette étude visant à isoler un protocole optimal pour mesurer la spatialisation tend à favoriser l'utilisation d'une procédure Mono-cible, malgré un nombre de mesures beaucoup plus faible (30 cibles à détecter contre 128 en Multi-cibles, pour un temps de passation équivalent). Cette étude montre également que l'utilisation de stimuli imagés ou lexicaux tend à générer des effets comparables, suggérant que ces deux types de stimulus pourraient être indifféremment proposés dans une tâche destinée à l'enfant d'âge scolaire. En dépit de cette indifférenciation, la sélection de stimuli imagés semble être la solution a priori la plus pertinente dans le cadre de l'approche développementale que nous envisageons dans les études qui suivent. En effet, ce type de stimulus permettrait d'assurer un meilleur contrôle inter-âge de l'accessibilité des items, là où des stimuli lexicaux auraient posé une limitation majeure chez les enfants les plus jeunes : en supposant que la présentation de mots écrits ait permis la détection d'un effet plus fort, une telle modalité aurait pu être préférée pour les enfants les plus âgés. Cependant, d'éventuelles divergences dans la rapidité du décodage de la trace écrite chez des enfants plus jeunes (i.e., en CP) nous auraient contraints à favoriser des stimuli imagés pour cette population, ce qui aurait pu *in fine* limiter nos comparaisons dans l'émergence du SPoARC entre différents niveaux scolaires. Ainsi, un paradigme basé sur une tâche de reconnaissance, impliquant la mémorisation d'images et le traitement d'une seule cible lors de la phase de test a été retenu pour l'Expérience 6, destinée à étudier le développement du SPoARC chez une population plus jeune.

3.3 Expérience 6

3.3.1 Objectif

L'objectif de l'Expérience 6 était d'investiguer la présence d'un SPoARC chez l'enfant par le biais d'un protocole classiquement utilisé chez l'adulte (i.e., basé sur la mesure des temps de réponse). Rappelons ici qu'un tel protocole a déjà été éprouvé chez des enfants âgés de cinq ans (scolarisés en fin d'école maternelle), sans qu'aucun effet SPoARC n'ait néanmoins pu être détecté au niveau du groupe (van Dijck et al., 2020). Par ailleurs, une analyse individuelle fondée sur l'approche bootstrap avait pu mettre en évidence des spatialiseurs au sein de l'échantillon, lesquels ne semblaient pas spatialiser l'information dans un sens unique (55% des spatialiseurs ayant montré un SPoARC orienté de gauche à droite, et 45% ayant montré une spatialisation orientée de droite à gauche). Sans mesure des temps de réponse, par le biais du paradigme de la grotte, Guida et al. (2020b) ont identifié que des enfants âgés de neuf ans (scolarisés en CE2 dans leur étude) présentaient des réponses compatibles avec une spatialisation gauche-droite en mémoire de travail (i.e., en associant le premier item d'une séquence de deux éléments à la gauche de leur espace physique, et le deuxième à la droite). Leurs résultats ont également montré que l'effet persistait chez les enfants plus âgés, scolarisés en CM1 et CM2.

Pour affiner les résultats apportés par ces deux études, la présente expérience propose d'investiguer l'évolution du phénomène auprès de trois groupes d'âges : des enfants de CP, de CE2 et de CM2. Le groupe de CP constitue le plus jeune groupe de l'école élémentaire, et succède immédiatement en âge à la cohorte recrutée par van Dijck et al. (2020). Investiguer la présence d'un SPoARC en CP permettra d'examiner si l'absence d'effet identifiée au niveau du groupe dans leur étude persiste à l'entrée de l'école élémentaire. Là où un paradigme simplifié n'a pas permis de faire émerger l'effet à cet âge (Guida et al., 2020b), un protocole basé sur les temps de réponse pourrait permettre une mesure plus fine du phénomène, notamment en fournissant un nombre substantiel d'essais pour chaque participant. Cependant, un *template* mental – dont l'élaboration est supposée découler de l'expertise avec le langage écrit (Guida & Campitelli, 2019) – pourrait ne pas être disponible en mémoire chez une majorité des enfants débutant leur apprentissage de la lecture/écriture, faute d'une exposition suffisante à cette activité. Si aucun SPoARC ne pouvait être observé au niveau du groupe en CP, une analyse individuelle pourrait néanmoins permettre la détection de quelques spatialiseurs dans l'échantillon, de la même manière que dans l'étude de van Dijck et al. (2020). Analyser l'effet sur le plan individuel permettrait de renseigner si l'entrée dans la lecture entraîne une convergence du SPoARC vers une direction culturellement déterminée chez ces spatialiseurs précoces, là où sa direction ne semble pas univoque chez des enfants

plus jeunes (van Dijck et al., 2020).

Le groupe de CE2 constitue le premier groupe d'âge pour lequel Guida et al. (2020b) ont identifié un effet. Investiguer s'il est également détectable par le biais de notre protocole permettrait d'affiner leur conclusion. Nous pourrions ainsi évaluer si la spatialisation, à cet âge, est facilitée par la présence de repères spatiaux durant la tâche (en l'occurrence, les deux grottes visibles du côté gauche et du côté droit de l'écran dans leur paradigme), ou si elle peut émerger en l'absence de ces repères, comme dans notre protocole où l'information est uniquement centrale. Un tel résultat renforcerait l'idée que la ligne mentale est *spontanément* mobilisée à cet âge pour organiser l'ordre d'une série maintenue en mémoire, indépendamment d'un quelconque étayage visuel. Dans le cas où notre tâche ne permettrait pas d'observer un SPoARC significatif en CE2, l'investigation de l'effet chez des enfants plus âgés (scolarisés en CM2) offrirait la possibilité d'évaluer si la spatialisation en mémoire de travail évolue vers un fonctionnement comparable à celui de l'adulte en fin de scolarité élémentaire.

Afin de mieux adapter le protocole retenu dans l'Expérience 5 à une approche développementale, l'effet SPoARC a été exploré par le biais de deux longueurs de séquence, à savoir des séquences de trois et de quatre items. L'utilisation de séries de quatre items visait à fournir une comparaison directe entre nos résultats chez l'enfant et ceux obtenus chez l'adulte dans la précédente expérience. De plus, cette longueur de séquence est retrouvée dans de nombreux travaux menés dans le domaine (de Belder et al., 2015 ; Ginsburg et al., 2017 ; Guida et al., 2018b ; Guida & Porret, 2022 ; van Dijck et al., 2013, 2014 ; Zhou et al., 2019, 2021), et des résultats récents suggèrent que l'utilisation de séries de quatre items pourrait être optimale dans la détection de l'effet chez une population adulte (Vivion et al., 2025b). Cependant, la littérature montre également que l'effet est sensible à l'augmentation du nombre d'items codés en mémoire, et que son occurrence tend à décliner à mesure que la taille de la séquence excède les limites de la mémoire de travail (Guida et al., 2018a ; Huber et al., 2016 ; Vivion et al., 2025b). Ainsi, là où l'utilisation de séries de quatre items semble être appropriée chez l'adulte, conserver un nombre équivalent d'items chez l'enfant pourrait au contraire réduire les chances d'observer un effet, du fait d'une plus faible capacité dans cette population (DeMarie & Ferron, 2003 ; Mathy et al., 2016, 2020 ; Ottem et al., 2007 ; Russell et al., 1996 ; Simmering, 2012). L'utilisation de séries de trois items (qui correspond à la taille du mémorandum dans l'étude menée par van Dijck et al., 2020) visait ainsi à favoriser la détection du SPoARC, notamment chez les enfants plus jeunes. Pour cette expérience, ces deux longueurs de séquence ont donc été proposées à l'ensemble des participants, offrant la possibilité d'évaluer la variation de l'effet en fonction du nombre d'items maintenus en mémoire à des stades développementaux distincts.

À titre complémentaire, cette sixième expérience propose d'étudier deux facteurs susceptibles d'influencer l'émergence du SPoARC chez l'enfant : le niveau de lecture/écriture et la capacité en mémoire de travail. Concernant le niveau de lecture, nous supposons que des capacités plus élevées dans le langage écrit sont favorables à l'émergence de l'effet, conformément à la théorie de l'expertise proposée par Guida et Campitelli (2019), et en accord avec de précédents travaux n'ayant pas identifié de SPoARC au niveau du groupe chez des populations illettrées (Guida et al., 2018b) ou pré-lettrées (van Dijck et al., 2020). Si l'apparition progressive du SPoARC selon l'âge pouvait déjà soutenir l'hypothèse de l'expertise, le lien direct entre la pente de spatialisation et les compétences en lecture/écriture permettrait de mieux cerner l'impact de la littératie sur ce phénomène. Au-delà d'étudier le lien entre littératie et spatialisation, nous tenterons également d'investiguer l'interaction entre l'effet SPoARC et la capacité mnésique verbale. Parce que les associations entre ordre et espace qui caractérisent le SPoARC sont supposées émerger en mémoire de travail (Guida & Lavielle-Guida, 2014 ; Guida & Campitelli, 2019 ; van Dijck & Fias, 2011), son apparition au cours du développement pourrait également dépendre de la maturation des capacités de maintien et de traitement à court terme. Un tel lien a pu être observé chez l'adulte dans des travaux ayant identifié qu'un SPoARC plus marqué était associé à une meilleure capacité en mémoire de travail verbale (Tian & Fischer-Baum, 2025 ; van Dijck et al., 2022). L'étude d'une telle relation chez l'enfant pourrait permettre de préciser si le SPoARC est davantage présent chez des enfants présentant une capacité mnésique plus élevée. Dans le cas d'une relation inverse (i.e., une plus faible capacité associée à une spatialisation plus marquée), nos résultats pourraient par ailleurs éclairer le rôle fonctionnel de ce phénomène, qui pourrait refléter un mécanisme compensatoire adopté précisément lorsque les capacités en mémoire à court terme sont encore limitées.

3.3.2 Méthode

3.3.2.1 Participants

Un échantillon de 113 participants a été recruté dans le cadre de cette étude. Sur ce premier échantillon, neuf enfants ont été écartés en raison d'un trouble visuel ($N = 2$), un trouble des apprentissages ($N = 1$), un problème technique survenu durant la tâche ($N = 1$), un contexte de passation non adéquat (décrochages fréquents, agitation ou croisement des mains de réponses à plusieurs reprises, $N = 3$) ou un déménagement ($N = 2$). Sur les 104 enfants restants, tous avaient une vision normale ou corrigée, et aucun ne présentait de trouble moteur, cognitif ou psychique connu. L'échantillon

final regroupait un total de 31 enfants scolarisés en CP[11] (âge moyen = 6.8 ans, ET = 0.24 ans), 36 enfants scolarisés en CE2 (âge moyen = 8.8 ans, ET = 0.31 ans) et 37 enfants scolarisés en CM2 (âge moyen = 10.9 ans, ET = 0.31 ans). L'effectif comprenait un total de 53 filles et 51 garçons (89 droitiers, 14 gauchers et un ambidextre) ; et parmi l'ensemble des participants, 84 étaient de langue maternelle française[12]. Les élèves ont été rencontrés au sein de trois établissements publics de la ville de Nice entre le deuxième et le troisième trimestre de l'année scolaire.

3.3.2.2 Tâche de spatialisation

Matériel Le programme PsychoPy implémenté dans la condition Mono-image de l'Expérience 5 a été réutilisé pour cette étude. Les stimuli étaient également identiques (i.e., des images colorées de fruits), à la différence que seuls huit des dix fruits présentés chez l'adulte ont été conservés. L'utilisation d'une série de huit fruits visait à permettre un meilleur équilibrage des séquences présentées durant la tâche. La liste retenue pour cette étude comprenait donc les items « banane », « cerise », « citron », « framboise », « kiwi », « orange », « pastèque » et « raisin » ; les items grenade et myrtille ayant été écartés car jugés moins familiers dans le quotidien des enfants.

Pour chaque condition expérimentale (L3 pour la tâche à trois items et L4 pour la tâche à quatre items), 64 séquences ont été élaborées et réparties en deux blocs homogènes (« Bloc 1 » et « Bloc 2 », chacun correspondant à une assignation réponse/main donnée). Quelle que soit la longueur de la séquence, chaque fruit a été présenté autant de fois à chaque position dans la phase de mémorisation (i.e., quatre occurrences par position et par bloc, soit huit occurrences par position sur l'ensemble de la tâche). L'occurrence de chaque fruit a également été équilibrée pour la phase de reconnaissance, de sorte que chaque item apparaisse quatre fois par bloc, soit huit fois au total. Un nombre équivalent d'items cibles et d'items leurres a été proposé lors de cette phase de reconnaissance, pour un total de 16 cibles et 16 leurres par bloc. La tâche de longueur 4 a permis un équilibrage optimal des positions sondées, chaque position ayant été testée quatre fois par bloc, soit huit fois sur l'ensemble de la tâche. La condition L3 ne permettant pas cet équilibrage, le choix a été fait de privilégier les positions extrêmes.

[11] Bien que cette taille d'échantillon soit inférieure à celle identifiée dans l'analyse de puissance conduite pour l'Expérience 5, elle reste comparable à celle utilisée dans des études antérieures (Guida et al., 2016, 2018a, 2020c). En outre, une analyse de puissance a posteriori a indiqué que cet effectif permettait de détecter un effet de taille modérée avec une puissance de 0.77.

[12] Sur les 20 participants n'ayant pas le français pour langue maternelle, sept étaient de langue maternelle arabe, trois de langue maternelle italienne, trois de langue maternelle roumaine et deux de langue maternelle tchétchène. Les cinq participants restants étaient respectivement de langue maternelle albanaise, anglaise, espagnole, russe et tamoul. Tous parlaient couramment le français, à l'exception du participant roumain qui disposait toutefois d'un niveau suffisant pour mener à bien l'expérience sans difficulté.

Ainsi, dans le Bloc 1, les positions 1 et 2 ont été sondées cinq fois chacune, contre six tests pour la position 3. La démarche inverse a été appliquée pour le Bloc 2, dans lequel la position 1 était testée six fois, contre cinq tests pour la position 1 et pour la position 2. Sur l'ensemble de la tâche à trois items, les positions extrêmes étaient ainsi sondées 12 fois chacune, contre 10 tests pour la position 2.

Procédure Chaque enfant a pris part à deux tâches de spatialisation, l'une en longueur 3 et l'autre en longueur 4. L'ordre dans lequel ces deux tâches ont été administrées a été contrebalancé entre les participants, de sorte que la moitié des enfants commence par la condition L3, et que l'autre moitié débute avec la condition L4. Chaque tâche était divisée en deux sessions, chacune correspondant à une assignation réponse/main donnée. Dans une session, les participants répondaient « oui » avec leur main gauche et « non » avec leur main droite, tandis que l'assignation inverse était utilisée pour l'autre session. L'ordre de ces deux assignations réponse/main était également contrebalancé entre les participants : la moitié des enfants débutaient la première session expérimentale en répondant « oui » avec la main gauche, tandis que l'autre moitié débutait en répondant « oui » avec la main droite. Pour éviter l'alternance trop fréquente entre les assignations réponses-main, l'assignation utilisée à la fin de la première tâche était conservée pour le début de la deuxième. Par exemple, un enfant débutant en L3 et répondant « oui » de sa main gauche pour la première session passait à la main droite pour la deuxième session. Cette assignation était ensuite conservée pour le début de la tâche L4, avant un retour à la main gauche pour la dernière session.

Idéalement, ces quatre sessions expérimentales étaient réparties sur quatre jours distincts : deux sessions d'une même longueur étaient réalisées sur deux journées consécutives, et un jour d'intervalle séparait les deux longueurs (e.g., un participant pouvait effectuer les deux sessions de longueur 3 le lundi et le mardi, puis celles de longueur 4 le jeudi et le vendredi). Dans la mesure du possible, l'enfant était rencontré à des créneaux horaires similaires – matin ou après-midi – pour ces quatre sessions. En pratique, un tel équilibrage a été difficile à appliquer strictement, les passations ayant pu être espacées de quelques jours. À l'inverse, aucun des participants n'a réalisé deux sessions successives sans un intervalle d'a minima quelques heures.

Les passations ont été réalisées de manière individuelle, dans une salle calme. L'enfant était placé à environ 50 cm de l'écran. L'expérimentateur, placé à côté de lui, suivait la passation sur un écran annexe. La première session expérimentale débutait par la présentation des consignes de la tâche de spatialisation. Ces consignes étaient lues à voix haute par l'expérimentateur pour les enfants en CP, et lues à voix haute par les enfants eux-mêmes à partir du CE2. Après la lecture des consignes, quatre séquences d'entraînement étaient proposées. Pour ces quatre séquences, l'expérimentateur

prenait soin de vérifier la performance de l'enfant (la tâche en elle-même n'apportait aucun feedback de sorte à être la plus proche de celle utilisée chez l'adulte). À l'issue de l'entraînement, une reformulation des consignes pouvait être proposée aux enfants les plus en difficulté. L'expérimentateur s'assurait enfin que les enfants étaient capables de nommer les fruits qui seraient présentés durant la tâche, en complétant leur réponse en cas d'erreur ou d'hésitation.

S'ensuivait la phase expérimentale, composée de 32 essais découpés en une phase de mémorisation – comprenant trois ou quatre items en fonction de la condition – et une phase de reconnaissance d'un item cible ou d'un item leurre (voir la méthode de l'Expérience 5 pour un détail des paramètres temporels de la tâche). Pour cet item test, le participant devait indiquer s'il faisait partie de la séquence mémorisée en appuyant soit sur la touche « S » soit sur la touche « L » du clavier de l'ordinateur, identifiables par des gommettes rouges ou vertes. En plus de ces gommettes, des bracelets de même couleur ont été placés aux poignets des enfants pour les aider. Une fois la réponse du participant collectée – ou au bout de 3500 ms en l'absence d'une réponse – l'expérimentateur cliquait sur une souris annexe pour passer à l'essai suivant. Ce dernier s'assurait par ailleurs que l'enfant conservait toujours ses mains sur les touches de réponse et qu'il disposait d'un niveau d'attention suffisant pour entamer un nouvel essai. De courtes pauses étaient systématiquement proposées à l'enfant au fil de la tâche.

Les trois sessions expérimentales suivantes se sont déroulées de la même manière (i.e., une phase d'entraînement suivie d'une phase de test), l'enfant pouvant re-consulter les consignes de la tâche autant de fois qu'il le souhaitait. Chaque session était complétée par la réalisation d'une mesure complémentaire, dont l'ordre d'administration variait entre les participants.

3.3.2.3 Mesures complémentaires

Lecture Les capacités en lecture ont été évaluées par le biais du test de l'*Alouette* (Lefavrais, 2005, 1967). Cette évaluation consistait en un texte dépourvu de sens, de 265 mots, que l'enfant devait lire à haute voix dans un délai maximal de 180 secondes. Pour amorcer la passation, l'expérimentateur proposait à l'enfant de démarrer la lecture et déclenchait le chronomètre. Il évaluait ensuite sa performance en temps réel, en notant les erreurs de déchiffrage, les mots ou les lignes sautées. Lorsque l'enfant s'attardait sur un mot pendant plus de cinq secondes sans parvenir à le lire, l'expérimentateur l'invitait à poursuivre en passant au mot suivant. La passation prenait fin lorsque l'enfant avait pu lire le texte dans sa globalité, ou lorsque le temps de lecture imparti était écoulé. L'expérimentateur reportait alors le nombre de mots lus par l'enfant (M), le nombre d'erreurs (E) et le temps de lecture (TL). Une estimation du nombre de mots correctement lus (C) a été réalisée en soustrayant le nombre d'erreurs de lecture

au nombre total de mots lus ($C = M - E$). Ces différents scores ont permis le calcul des deux indices retenus pour cette étude : *i)* un indice d'exactitude (CM) renvoyant à la proportion de mots correctement lus sur le nombre de mots total ($CM = \frac{C}{M} \times 100$) et *ii)* un indice de vitesse (CTL) qui tenait compte à la fois de l'exactitude et du temps de lecture du texte par rapport au temps maximum ($CTL = \frac{CM \times 180}{TL}$). Le premier indice permettait d'estimer la précision de la lecture indépendamment du temps mis par l'enfant pour lire le texte. Le deuxième, en intégrant le facteur temporel, permettait une estimation du compromis vitesse-exactitude mis en place par l'enfant pour lire de manière optimale (Cavalli et al., 2018).

Écriture Le niveau d'écriture a été mesuré par le biais de l'*Échelle d'évaluation rapide de l'écriture chez l'enfant* (BHK, Charles et al., 2004). Lors de ce test, l'enfant devait recopier un texte sans interruption pour une durée maximale de cinq minutes. L'expérimentateur invitait l'enfant à écrire comme à son habitude, en précisant qu'il ne devait écrire « ni trop beau, ni trop laid », en accord avec les consignes fournies dans le manuel. L'enfant devait écrire sur une feuille blanche, dépourvue de lignes, et pouvait choisir l'outil scripteur avec lequel il avait le plus l'habitude d'écrire. Par ailleurs, il lui était spécifié qu'il ne pouvait utiliser ni gomme ni correcteur pendant la passation, afin que la copie soit réalisée sans interruption. À l'issue du temps imparti, l'enfant était invité à lever le stylo, et le nombre de caractères copiés en cinq minutes était retenu comme score de vitesse. La BHK permet également la cotation d'un score de graphisme, *via* l'évaluation de la qualité d'écriture sur les cinq premières lignes du texte. Pour les enfants les plus jeunes, il arrivait que ces cinq lignes ne puissent pas être recopiées dans leur intégralité à l'issue des cinq minutes. Si tel était le cas, l'expérimentateur relevait le dernier caractère écrit dans le temps imparti pour calculer le score de vitesse. Il laissait ensuite l'enfant terminer sa copie jusqu'à ce que les cinq premières lignes soient complétées. Le score de graphisme a été déterminé sur la base des 13 critères suivants (détaillés dans l'Encadré C.1 en Annexe C) :

- ☐ Écriture grande
- ☐ Inclinaison de la marge vers la droite
- ☐ Lignes non planes
- ☐ Mots serrés
- ☐ Écriture chaotique
- ☐ Liens interrompus entre les lettres
- ☐ Télescopages
- ☐ Variation de la grandeur des lettres troncs
- ☐ Hauteur relative incorrecte
- ☐ Distorsion des lettres
- ☐ Formes de lettres ambiguës
- ☐ Lettres retouchées
- ☐ Hésitation et tremblements

Un score élevé à cette échelle traduit une qualité graphique moindre, tandis qu'une écriture soignée et structurée spatialement sera associée à un score de graphisme plus faible.

Capacité mnésique La capacité mnésique des participants a pu être estimée sur la base des performances observées lors de la tâche de spatialisation. Pour chaque condition (L3 et L4), la capacité a été calculée à l'aide de la formule suivante (inspirée de Cowan, 2001 ; voir aussi Rouder et al., 2011, p. 325) :

$$k = L(pH - pFA)$$

où L renvoie à la longueur de la séquence, pH à la proportion de *hits* (correspondant au nombre d'items cibles correctement détectés par le participant) et pFA à la proportion de fausses alarmes (correspondant aux nombres d'items leurres reconnus à tort comme faisant partie de la séquence). Le calcul de la capacité par le biais de cette formule présente l'intérêt d'estimer de manière assez fidèle le nombre d'éléments réellement actifs en mémoire de travail (Cowan, 2001, 2010 ; Rouder et al., 2011). L'utilisation d'un tel indice présentait également l'avantage d'estimer l'efficience mnésique dans le même contexte expérimental que le SPoARC (i.e., la mémorisation d'une série d'items présentés en modalité visuelle, suivie d'une phase de reconnaissance), favorisant une comparaison plus directe entre spatialisation et capacité. La capacité maximale de chaque participant a été déterminée en sélectionnant le score le plus élevé obtenu entre les deux longueurs de séquence.

Deux subtests issus de l'épreuve *Mémoire des chiffres* de la *WISC-V* (Wechsler, 2016) ont également été administrés à un sous-groupe de participants (pour des raisons techniques, ces mesures n'ont pas pu être réalisées pour 6 élèves de CP, 13 élèves de CE2 et 10 élèves de CM2). Malgré un échantillon restreint, ces données ont été conservées pour l'analyse dans la mesure où elles permettent une appréciation plus fine des capacités mnésiques des participants, notamment en distinguant les mécanismes de maintien pur (ordre direct) de ceux impliquant un traitement plus actif de l'information (ordre inverse). Pour la tâche en ordre direct, l'expérimentateur annonçait oralement une série de chiffres à l'enfant, au rythme d'une seconde par item. L'enfant devait ensuite rappeler la série dans le même ordre, tandis que l'expérimentateur notait sa réponse. Un point était administré lorsque la séquence était correctement rappelée (i.e., tous les items étaient énoncés dans le bon ordre), tandis qu'une erreur (transposition, omission, intrusion ou substitution) donnait lieu à un score nul. Les séries débutaient à deux items et étaient incrémentées d'un chiffre toutes les deux séquences, pour un maximum de dix items à mémoriser. Au total, 18 séquences pouvaient être présentées au participant, et la passation était interrompue lorsque ce dernier échouait à deux séries successives de même longueur. La même procédure a été appliquée en ordre inverse, à la différence que le participant devait rappeler chaque série en allant du dernier item entendu jusqu'au premier. Pour cette tâche, deux séries d'entraînement précédaient les 18 séries tests, dont la longueur variait de deux à huit items (les longueurs 2 et

3 étant chacune répétées quatre fois au lieu de deux). Pour chaque condition (ordre direct et ordre inverse), deux mesures ont été relevées : un score brut (correspondant au nombre de séquences correctement rappelées) et l'empan du participant (correspondant au nombre d'items de la dernière séquence correctement rappelée).

3.3.3 Résultats

3.3.3.1 Analyses préliminaires

Taux de réussite Le taux de réussite moyen pour la tâche à trois items était de .85 (ET = .9, min = .56, max = .98) et de .79 (ET = .10, min = .58, max = 1) pour la tâche à quatre items. Une ANOVA à deux facteurs a été effectuée afin d'évaluer l'effet du groupe d'âge (à trois niveaux, CP *vs.* CE2 *vs.* CM2) et de la longueur de la séquence (L3 *vs.* L4) sur le taux de réussite des participants. Cette analyse a révélé un effet significatif de la longueur, avec de meilleures performances dans la tâche de longueur 3, en comparaison à la longueur 4 ($F(1, 101) = 55.88, p < .001, \eta^2_{\text{p}} = .356$). Un effet significatif du groupe d'âge a été également identifié, montrant que les performances globales différaient entre les niveaux, et ce, quelle que soit la longueur de la tâche ($m_{CP} = .77$, $ET = .11$, $m_{CE2} = .83$, $ET = .09$ et $m_{CM2} = .86$, $ET = .09$; $F(2, 101) = 11.66, p < .001, \eta^2_{\text{p}} = .188$). Des contrastes post-hoc ont été effectués avec une correction de Tukey pour comparer les résultats des groupes d'âge par paires. Les contrastes ont révélé une plus faible performance chez les enfants de CP comparés aux CE2 ($\Delta = -0.06, p = .01$) et aux CM2 ($\Delta = -0.09, p < .001$). Aucune différence significative entre les enfants de CE2 et CM2 n'a été mise en évidence ($p = .156$). Par ailleurs, aucun effet d'interaction entre les facteurs Groupe et Longueur n'a été observé, indiquant que les différences de performance entre groupes d'âge n'étaient pas modulées par le nombre d'items dans la séquence ($F(2, 101) = 1.83, p = .166, \eta^2_{\text{p}} = .035$). La même analyse réalisée uniquement sur les items cibles (i.e., des items présents dans la séquence mémorisée) a révélé des patterns de résultats identiques (voir le Tableau C.11 en Annexe C pour un aperçu des proportions de bonnes réponses pour chaque groupe d'âge et chaque longueur).

Temps de réponse Pour conserver la variabilité des temps de réponse pour chaque longueur de séquence tout en limitant le poids de valeurs extrêmes, une winsorization a été appliquée pour chaque longueur séparément. Pour un même participant, une moyenne individuelle et des limites inférieure et supérieure ont été calculées à partir des temps obtenus pour la longueur 3. Les valeurs extrêmes situées en dehors de ces bornes inférieures et supérieures ont été remplacées par les valeurs des limites elles-mêmes,

conduisant à la transformation de 4% des données dans cette condition expérimentale. La même procédure a été appliquée aux temps de réponse pour la longueur 4, aboutissant à la winsorization de 5% des données. Le temps de réponse moyen était de 1313 ms (ET = 483 ms) pour la longueur 3 et de 1357 ms (ET = 514 ms) pour la longueur 4. Sur un plan descriptif, les temps de réponse des participants tendaient à diminuer avec l'âge, que ce soit pour des séquences de trois items (m_{CP} = 1491 ms, ET = 502 ms ; m_{CE2} = 1330 ms, ET = 468 ms ; m_{CM2} = 1163 ms, ET = 431 ms) ou pour des séquences de quatre items (m_{CP} = 1512 ms, ET = 532 ms ; m_{CE2} = 1362 ms, ET = 501 ms ; m_{CM2} = 1237 ms, ET = 480 ms), un effet qui s'est avéré significatif dans les analyses présentées ci-après. Des corrélations ont été exécutées entre le temps de réponse moyen et la proportion de bonnes réponses des participants pour s'assurer que des participants plus rapides ne tendaient pas à être moins exacts dans leurs réponses. Aucune relation significative n'a été observée pour des séquences de longueur 3 ($\rho = -0.01$, $p = .935$). En revanche, une tendance marginale a été relevée pour les séquences de longueur 4, suggérant que les participants les plus lents tendaient également à être les moins précis ($\rho = -0.19$, $p = .052$).

3.3.3.2 Effet de spatialisation : Modèles linéaires mixtes généralisés

L'effet SPoARC a d'abord été testé par le biais de modèles mixtes généralisés. Cette première analyse visait à évaluer la présence de l'interaction Main × Position caractéristique du SPoARC, tout en investiguant son éventuelle variation en fonction du groupe d'âge (CP, CE2 et CM2) et en fonction de la longueur des séquences mémorisées durant la tâche (L3 et L4). La distribution globale des temps de réponse présentant une asymétrie positive ($skewness$ = 0.83, voir la Figure C.9 en Annexe C), une distribution Gamma a été utilisée comme référence dans nos modèles, ce type de distribution ayant été identifiée comme s'ajustant le mieux aux données après un test $fitDist$. Afin de tenir compte de potentiels effets d'apprentissage ou de fatigue au sein d'une session expérimentale, le facteur Numéro d'essai a été intégré aux modèles mixtes. Cependant, les passations ayant été discontinues (contrairement aux adultes de l'Expérience 5, pour lesquels deux sessions étaient séparées par une courte pause), le numéro d'essai a été réinitialisé à 1 pour chaque session expérimentale. Le numéro d'essai pouvait donc être compris entre 1 et 32. Un deuxième facteur a été intégré aux modèles pour tenir compte d'une potentielle variation des temps de réponse entre les différentes sessions expérimentales (S1, S2, S3 et S4). Les effets d'interaction entre ces deux variables n'ont pas été intégrés dans nos modèles, l'objectif étant simplement de contrôler la variabilité liée à l'organisation temporelle des passations. Ces facteurs de contrôle ont également été tenus hors des interactions avec les facteurs d'intérêt, comme cela était le cas pour l'Expérience 5. Deux facteurs aléatoires – Sujet et Item – ont également été pris en

compte dans l'ensemble des modèles.

La même logique hiérarchique que celle présentée dans l'Expérience 5 a été appliquée pour cette analyse : un premier modèle n'impliquant que le facteur aléatoire Sujet a été progressivement enrichi par le deuxième facteur aléatoire (Item), les deux facteurs de contrôle (Numéro d'Essai et Session) ainsi que les facteurs d'intérêt (Position, Main, Groupe d'âge et Longueur), qui ont été introduits un à un. Après avoir modélisé les effets principaux, les effets d'interaction entre les facteurs d'intérêt ont été progressivement intégrés, en commençant par des interactions à deux facteurs, puis à trois, pour terminer par le modèle le plus complexe rendant compte de l'interaction de toutes les variables d'intérêt (voir le Tableau C.12 en Annexe C pour un aperçu des différents modèles).

Le modèle présentant la plus faible valeur AIC était le modèle $M14$, rendant compte d'une interaction de l'effet SPoARC avec le groupe d'âge, ainsi qu'un effet simple du facteur Longueur sur les temps de réponse ($M14 \longleftarrow \text{TR} \sim \text{Position} \times \text{Main} \times \text{Groupe} + \text{Longueur} + \text{Essai} + \text{Session} + (1|\text{I}) + (1|\text{S})$). L'indice de vraisemblance de ce premier modèle ne différait pas significativement de celui associé au modèle classé second ($\chi^2(7) = 6.45$, $p = .488$). Ce second modèle ($M18$) rendait compte d'une interaction de plus grand intérêt pour cette expérience, à savoir une modulation de la spatialisation par le groupe d'âge, mais également par la longueur de la séquence ($M18 \longleftarrow \text{TR} \sim \text{Position} \times \text{Main} \times \text{Groupe} \times \text{Longueur} + \text{Essai} + \text{Session} + (1|\text{I}) + (1|\text{S})$). Ces deux modèles étant statistiquement équivalents sur le plan de la vraisemblance, une analyse détaillée des effets capturés par le modèle $M18$ a été privilégiée pour cette étude (ce dernier étant par ailleurs statistiquement différent du modèle classé en troisième position, $\chi^2(10) = 22.02$, $p = .015$). La table de classement d'AIC est disponible en Annexe C (voir le Tableau C.13).

Dans le modèle $M18$, un effet significatif de la position a été identifié, indiquant des temps de réponse de plus en plus courts à mesure que la position de l'item dans la séquence était tardive ($t(5528) = -18.90$, $p < .001$, $Std.\beta = -61.71$). Des effets principaux des facteurs Main, Longueur et Session se sont avérés également significatifs (voir le Tableau C.14 en Annexe C pour les statistiques relatives à ces effets). Un effet du Groupe d'âge a été détecté, avec des temps de réponse de plus en plus courts à mesure que les enfants étaient plus âgés ($m_{CP} = 1501$ ms, $ET = 517$ ms, $m_{CE2} = 1345$ ms, $ET = 484$ ms, $m_{CM2} = 1200$ ms, $ET = 457$ ms ; $t(5528) = -18.91$, $p < .001$, $Std.\beta = -111.78$). Cette variation dans les temps de réponse s'est avérée interagir significativement avec la longueur de la séquence, la régression des temps de réponse avec l'âge étant plus marquée en condition L3 qu'en condition L4 ($t(5528) = 9.29$, $p < .001$, $Std.\beta = 25.84$, voir les analyses préliminaires pour un aperçu des temps de réponse moyens par classe et par longueur).

Concernant la spatialisation, l'interaction Position × Main indiquant un SPoARC n'a pas atteint le seuil de significativité lorsque considérée sur l'ensemble des conditions expérimentales ($t(5528) = -1.29, p = .199, Std.\beta = 44.63$). En revanche, une interaction significative entre Position, Main et Longueur a été observée. Quel que soit l'âge des participants, la manifestation du SPoARC s'est avérée dépendante du nombre d'items dans la séquence mémorisée ($t(5528) = -10.23$, $p < .001$, $Std.\beta = -30.39$, voir le Tableau C.15 en Annexe C pour un détail des temps de réponse observés dans chaque modalité). De prime abord, les deux longueurs ont conduit à des temps de réponse globalement descendants en fonction de la position, et ce, quelle que soit la main de réponse (voir la Figure 3.6). Cependant, un avantage de la main gauche par rapport à la main droite est visible pour le premier et le deuxième item en longueur 3, tandis que la différence main gauche/main droite est moins notable pour ces premiers items en longueur 4. Par contraste, la tâche en longueur 4 a uniquement permis d'observer un avantage de la main droite par rapport à la main gauche pour le dernier item, bien que des contrastes aient révélé que l'interaction Main × Position n'était que marginalement significative dans cette condition expérimentale ($\beta = -14$, $ES = 5.93$, $z = -2.35$, $p = .086$). La manifestation du SPoARC s'est avérée également différer en fonction du groupe d'âge ($t(5528) = -10.23$, $p < .001$, $Std.\beta = -30.39$). En revanche, l'interaction attendue dans nos hypothèses (à savoir une modulation de la spatialisation en fonction à la fois de la longueur de séquence mais aussi du groupe d'âge) n'a pas atteint le seuil de significativité dans cette analyse ($t(5528) = 1.23, p = .218, Std.\beta = 2.70$).

Pour affiner cette première analyse, des modèles complémentaires ont été réalisés en transformant la variable Position (voir Vivion et al., 2025b, pour une approche similaire). Dans l'analyse précédente, la position de l'item a été considérée comme une valeur *brute* (1 correspondant au premier item, 2 au deuxième item, etc.). Cependant, tenir compte uniquement de la valeur brute de chaque position pourrait comporter une limite, dans la mesure où ces valeurs pourraient ne pas être directement comparables d'une longueur de séquence à une autre. Par exemple, là où la valeur brute *3* dans une série de trois éléments correspond au dernier item de la séquence, elle correspond en revanche à l'avant-dernier item d'une série de quatre éléments. Or, il est plausible que certaines positions, comme le dernier item, revêtent un statut spatial particulier au sein de la ligne mentale (e.g., la main droite pourrait être plus rapide pour un dernier item, qu'il soit le dernier d'une série de 3 items ou d'une série de 4). Plus spécifiquement, un item situé en position 3 dans une séquence de trois items – soit $I3_{L3}$ – pourrait être représenté tout à droite dans l'esprit du participant, tout comme un item en position 4 dans une séquence de quatre items – soit $I4_{L4}$. Si l'on se fie aux valeurs brutes, $I4_{L4}$ apparaît comme artificiellement plus éloigné spatialement que $I3_{L3}$, alors que leurs localisations au sein de la ligne mentale pourraient être équivalentes. Ainsi, considérer la valeur *relative* de chaque position pourrait permettre de mieux

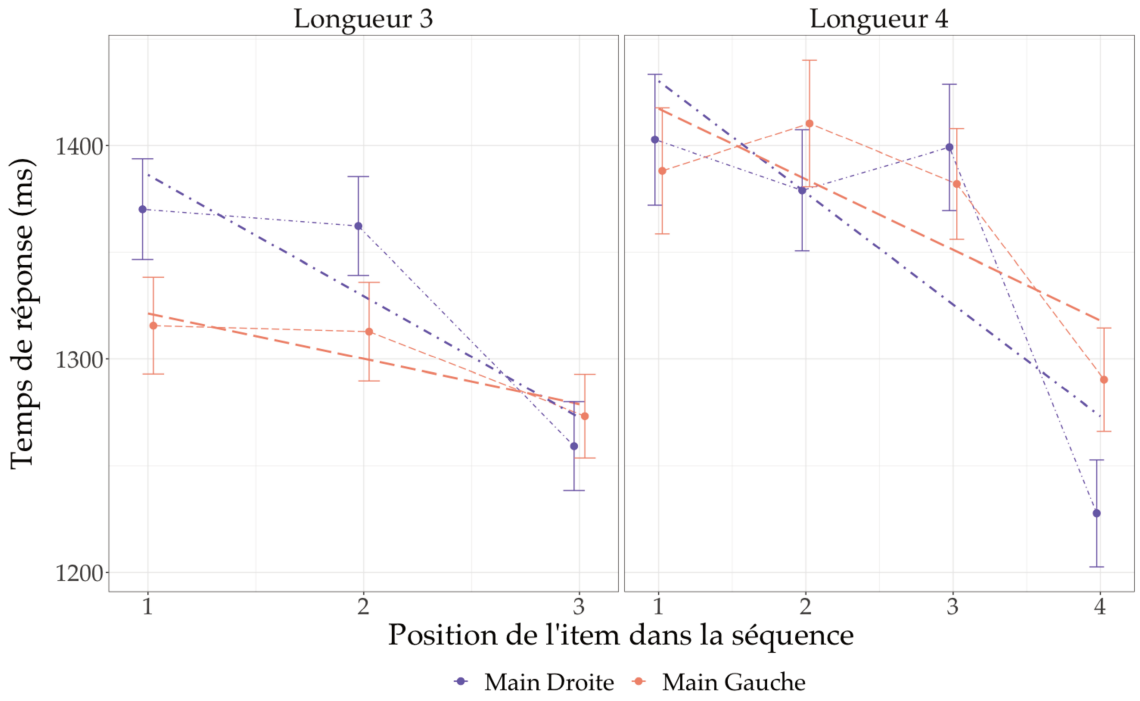


FIGURE 3.6 – Moyenne et régression linéaire des temps réponse (exprimés en millisecondes) en fonction de la position de l'item dans la séquence, de la main de réponse et du groupe d'âge et du nombre d'items pour l'Expérience 6. *Note.* Les barres d'erreur correspondent à ± 1 Erreur Standard.

modéliser les correspondances entre les longueurs de séquences, notamment en ce qui concerne les valeurs spatiales pouvant être attribuées aux items.

Pour mieux tenir compte de la position relative des items, un recodage du facteur Position a été effectué sur la base d'une échelle commune allant de -1 à $+1$. Pour une longueur de trois items, les positions 1, 2 et 3 correspondaient respectivement aux valeurs -1, 0 et $+1$, la valeur zéro représentant le point médian de la séquence. Pour une longueur de quatre items, les quatre positions correspondaient respectivement aux valeurs -1, -0.33, $+0.33$ et $+1$. Grâce à ce recodage, les premiers et derniers items étaient alignés sur des valeurs constantes (-1 et $+1$), et les items intermédiaires répartis autour de la valeur zéro. Des modèles hiérarchiques identiques à ceux de la première analyse ont été effectués, en prenant en compte cette nouvelle variable. Le classement d'AIC a abouti aux mêmes résultats, à savoir l'identification du modèle $M14$ comme s'ajustant le mieux aux données, sans que celui-ci ne diffère significativement du modèle d'intérêt $M18$, classé en deuxième position ($\chi^2(7) = 12.69$, $p = .08$).

Dans l'analyse du modèle $M18$ (significativement différent du modèle suivant, $p = .017$), l'interaction Position × Main × Groupe d'âge × Longueur a atteint le seuil de significativité, suggérant que l'apparition du SPoARC dans certains groupes d'âge a

pu dépendre de l'utilisation d'une longueur de séquence spécifique ($t(5528) = 4.32$, $p < .001$, $Std.\beta = 5.32$). Une telle modulation est visible sur la Figure 3.7, qui illustre les patterns de temps de réponse entre les mains gauche et droite pour chaque groupe d'âge et chaque longueur. Sur ce graphique, des patterns similaires entre les deux longueurs sont visibles pour les enfants de CP. Quelle que soit la longueur des séquences, les mains de réponses se sont avérées globalement identiques, montrant seulement un effet global de la position sur les temps de réaction. Ces résultats suggèrent qu'aucune longueur de séquence n'a permis de capturer un effet SPoARC dans cet échantillon. À l'inverse, des patterns plus caractéristiques du SPoARC ont pu être identifiés pour les enfants en CM2, bien que la variation des temps de réponse entre les deux mains diffère selon la longueur considérée. En L3, le SPoARC semble caractérisé par un effet de « primauté spatiale » (i.e., une différence de temps de réponse située sur les premiers items), tandis que la spatialisation semble avoir plutôt concerné le dernier item en L4. Par ailleurs, c'est pour le groupe de CE2 que l'effet de la longueur semble le plus marqué. Pour des séquences de trois items, un avantage de la main gauche est observé, notamment pour la première position, suggérant la présence d'un SPoARC dans cette condition expérimentale (un résultat que nous élucidons dans l'analyse de régression présentée plus bas). En revanche, l'utilisation de séquences de quatre items ne semble pas avoir abouti à un effet de spatialisation, la variation des temps de réponse en fonction de la position étant globalement similaire entre les deux mains pour cette longueur. Le Tableau C.15 en Annexe C reporte les temps de réponse moyens observés pour chaque cellule du plan expérimental.

3.3.3.3 Effet de spatialisation : régression linéaire

Dans un second temps, l'effet SPoARC a été examiné par le biais de régressions linéaires à mesures répétées, menées sur la différence des temps de réponse entre main droite et main gauche selon la position dans la séquence (d_{TR}). Pour contraster la manifestation du SPoARC entre les deux tâches, des régressions ont été modélisées séparément pour chaque condition (L3 et L4). L'analyse a d'abord été conduite sur l'ensemble des participants pour rendre compte d'un effet global, avant d'être déclinée pour chaque groupe d'âge.

Longueur de 3 items L'analyse de régression effectuée sur l'ensemble de l'échantillon en condition L3 a rendu compte d'une pente de spatialisation significativement différente de zéro, avec des d_{TR} régressant en moyenne de 44 ms par position ($t(207) = -2.32$, $p = .021$, $Std.\beta = -0.11$; $d_{TR-P1} = 78.88$ ms, $ET = 357$ ms ; $d_{TR-P2} = 49$ ms, $ET = 320$ ms ; $d_{TR-P3} = \breve{}10$ ms, $ET = 306$ ms). En considérant l'ensemble des participants, un effet SPoARC significatif a donc pu être mis en évidence dans cette

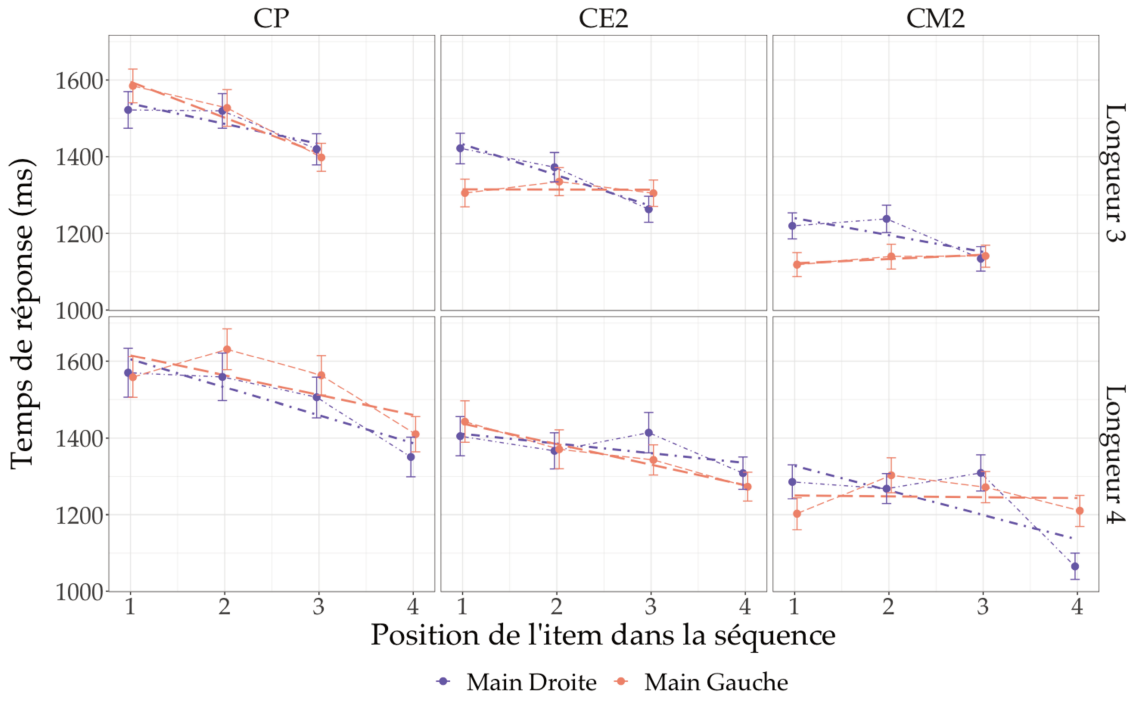


FIGURE 3.7 – Moyenne et régression linéaire des temps réponse (exprimés en millisecondes) en fonction de la position de l'item dans la séquence, de la main de réponse, du groupe d'âge et du nombre d'items pour l'Expérience 6. *Note.* Les barres d'erreur correspondent à ± 1 Erreur Standard.

tâche (voir la Figure C.10 en Annexe C).

L'analyse par groupe d'âge a permis d'observer une variation de l'effet SPoARC entre les différents échantillons, comme le montre la Figure 3.8. Pour les enfants scolarisés en CP, les d_{TR} moyens augmentaient en moyenne de 5 ms par position, sans que le coefficient de la pente ne diffère significativement de zéro ($t(61) = 0.12$, $p = .90$, $Std.\beta = 0.01$). Pour confirmer l'absence d'effet dans ce groupe d'âge, une régression restreinte aux valeurs extrêmes (i.e., la première et la dernière position) a été réalisée. Cette analyse avait pour objectif d'examiner si un codage spatial pouvait être détecté pour ces deux positions les plus éloignées. La pente calculée pour ces valeurs extrêmes n'a pas atteint le seuil de significativité ($\beta = 9.02$, $t(30) = 0.12$, $p = .90$, $Std.\beta = 0.01$). Parce que la spatialisation aurait également pu concerner une position spécifique, une analyse plus fine a été conduite pour chaque position isolément. Dans cette analyse, la moyenne des d_{TR} individuelles a été opposée à une moyenne théorique de zéro pour chaque position par le biais d'un test t de Student. Pour une position donnée, une d_{TR} moyenne significativement positive indique un avantage de la main gauche, tandis qu'une d_{TR} moyenne significativement négative reflète un avantage de la main droite. Cette analyse n'a pas permis de mettre en évidence une d_{TR} différant significativement

de zéro (tous les $|t| \leq 0.21$, tous les $p \geq .83$, tous les $|d|$ de Cohen ≤ 0.04).

Pour les enfants de CE2, les résultats ont indiqué que les d_{TR} diminuaient en moyenne de -83 ms par position, la pente de régression différant significativement de zéro ($t(71) = -2.49$, $p = .015$, $Std.\beta = -0.19$). Comme suggéré par les patterns mis en évidence dans l'analyse des temps de réponse, un SPoARC a pu être identifié pour ce groupe d'âge. Pour les enfants de CM2, bien qu'une diminution des d_{TR} en fonction de la position de l'item ait pu être identifiée de manière descriptive, la pente obtenue ne différait que marginalement de zéro. Ce résultat a été observé à la fois en considérant l'ensemble des positions de la séquence ($\beta = -47.82$, $t(73) = -1.65$, $p = .10$, $Std.\beta = -0.14$) ou en cantonnant l'analyse aux positions extrêmes ($\beta = -95.63$, $t(36) = -1.66$, $p = .11$, $Std.\beta = -0.18$). En revanche, l'analyse par position a révélé une d_{TR} moyenne significativement positive pour la position 1 ($d_{TR-P1} = 101.35$ ms, $ET = 295$ ms ; $t(36) = 2.09$, $p = .044$, d de Cohen $= 0.34$). Pour la position 2, les résultats ont indiqué que la d_{TR} moyenne observée ne différait que marginalement de zéro, bien qu'une taille d'effet comparable à la position 1 ait été identifiée ($d_{TR-P2} = 95$ ms, $ET = 296$ ms, $t(36) = 1.95$, $p = .059$, d de Cohen $= 0.32$). Le Tableau C.16 en Annexe C reporte les d_{TR} obtenus pour chaque position et dans chaque groupe d'âge en longueur 3.

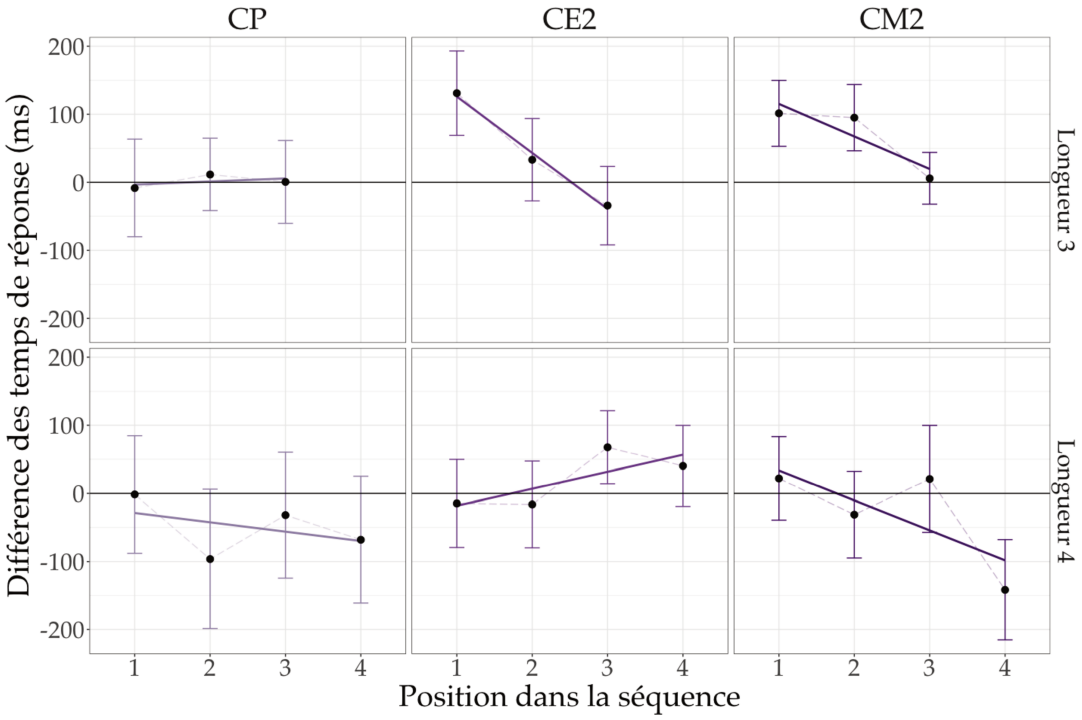


Figure 3.8 – Régression linéaire de la différence des temps de réponse moyens (d_{TR}) entre main droite et main gauche en fonction de la position de l'item, du groupe d'âge et de la longueur de la séquence mémorisée pour l'Expérience 6. *Note.* La figure a été réalisée sur les données agrégées par position et par sujet, et les barres d'erreur correspondent à ± 1 Erreur Standard.

Longueur de 4 items Pour la tâche à quatre items, les résultats ont indiqué que les d_{TR} régressaient en moyenne de –14 ms par position. Cependant, le coefficient de la pente de régression ne s'est pas avéré significativement différent de zéro ($t(303.26) = -0.92$, $p = .358$, $Std.\beta = -0.04$; $d_{TR-P1} = 2$ ms, $ET = 406$ ms ; $d_{TR-P2} = –45$ ms, $ET = 440$ ms ; $d_{TR-P3} = 22$ ms, $ET = 437$ ms ; $d_{TR-P4} = –57$ ms, $ET = 442$ ms). Contrairement à la tâche à trois items, la tâche de longueur 4 n'a donc pas conduit à un SPoARC significatif en considérant l'ensemble de l'échantillon (voir la Figure C.10 en Annexe C). Cette absence d'effet global a été confirmée dans l'analyse restreinte aux positions extrêmes ($\beta = -64.31$, $t(101.06) = -1.40$, $p = .166$, $Std.\beta = -0.08$).

Le SPoARC a ensuite été investigué pour chaque groupe d'âge séparément. Pour les enfants de CP, les résultats ont indiqué que les d_{TR} diminuaient en moyenne de -14 ms par position, sans que le coefficient de la pente obtenue ne diffère significativement de zéro ($t(87.646) = -0.44$, $p = .661$, $Std.\beta = -0.03$). Aucun effet n'a pu être mis en évidence non plus en analysant uniquement les positions extrêmes ($\beta = -70.93$, $t(29.66) = -0.81$, $p = .427$, $Std.\beta = -0.07$) ou chaque position isolément (tous les $|t| \leq 0.94$, tous les $p \geq .36$, tous les $|d|$ de Cohen ≤ 0.17). Cette absence d'effet a persisté pour les enfants de CE2, que ce soit en considérant l'ensemble des positions ($\beta = 22.63$, $t(105.38) = 0.95$, $p = .343$, $Std.\beta = 0.07$), uniquement les positions extrêmes ($\beta = 51.50$, $t(34.42) = 0.70$, $p = .488$, $Std.\beta = 0.07$) ou chaque position séparément (tous les $|t| \leq 1.27$, tous les $p \geq .21$, tous les $|d|$ de Cohen ≤ 0.21). Par contraste avec ces deux groupes, les enfants de CM2 ont montré un SPoARC significatif, les d_{TR} diminuant en moyenne de 49 ms par position ($t(108.80) = -2.18$, $p = .032$, $Std.\beta = -0.13$, voir la Figure 3.8). Le Tableau C.16 en Annexe C précise les d_{TR} moyennes observées pour chaque position et chaque groupe d'âge.

Des tests t de Student pour échantillons appariés ont enfin été effectués par groupe d'âge pour opposer la moyenne des pentes individuelles calculées pour chaque longueur. Pour chaque participant, une analyse de régression a été conduite sur les d_{TR} associées à chaque position, la magnitude du coefficient reflétant la taille de l'effet de spatialisation, et le signe associé traduisant son orientation (e.g., gauche-droite dans le cas d'un coefficient négatif). Pour les CP, la comparaison de moyennes n'a pas indiqué de différence significative entre les pentes obtenues en condition L3 ($M_{L3} = 4.51$, $ET = 210$) ou en condition L4 ($M_{L4} = -11.18$, $ET = 175$; $t(30) = 0.30$, $p = .768$, d de Cohen $= 0.08$). Pour les CE2, une différence significative entre les deux longueurs a été observée, suggérant que l'utilisation d'une tâche à trois items a favorisé l'émergence d'une spatialisation pour ce groupe d'âge ($M_{L3} = -82.75$, $ET = 215$ *vs.* $M_{L4} = 15.88$, $ET = 149$; $t(35) = -2.19$, $p = .036$, d de Cohen $= -0.53$, voir la Figure C.11 en Annexe C). Pour les CM2, les analyses ont révélé des pentes similaires entre les longueurs 3 et 4 ($M_{L3} = -47.82$, $ET = 176$ et $M_{L4} = -46.13$, $ET = 137$; $t(36) = -0.06$, $p = .954$, d de Cohen $= -0.01$), indiquant une spatialisation équivalente quel que soit le nombre

d'items mémorisés.

3.3.3.4 Effet de spatialisation : Bootstrap

Pour compléter l'analyse du SPoARC, la méthode bootstrap a été appliquée afin de calculer les intervalles de confiance H1 à 80% des pentes empiriques observées pour la tâche de longueur 3 et la tâche de longueur 4. En condition L3, 26 enfants (25%) ont été identifiés comme spatialiseurs gauche-droite, 67 enfants (64%) n'ont montré aucun effet fiable, tandis que 11 enfants (11%) ont été labellisés comme spatialiseurs inverses[13]. Un χ^2 d'ajustement a révélé que cette répartition différait d'une distribution liée au hasard ($\chi^2(2) = 48.48$, $p < .001$, W de Cohen $= 0.68$). Un test binomial (basé sur une probabilité $\pi = \frac{1}{2}$) a ensuite été effectué pour déterminer si la proportion de spatialiseurs gauche-droite était significativement supérieure à celle des spatialiseurs droite-gauche[14]. Les résultats ont indiqué une asymétrie significative en faveur d'un SPoARC orienté de gauche à droite (26 spatialiseurs gauche-droite sur 37 spatialiseurs, $p = .01$, h de Cohen $= 0.30$). Pour la tâche en L4, 28 enfants (27%) ont présenté une pente négative significative, 57 enfants (55%) n'ont montré aucun effet et 19 enfants (18%) ont présenté une pente positive significative. De la même manière qu'en condition L3, la répartition des participants entre les trois types de spatialisation s'est avérée différente d'une distribution liée au hasard ($\chi^2(2) = 22.75$, $p < .001$, W de Cohen $= 0.47$). En revanche, le test binomial n'a pas permis d'attester que la répartition entre spatialiseurs gauche-droite et spatialiseurs droite-gauche différait significativement d'une répartition aléatoire (28 spatialiseurs gauche-droite sur 47 spatialiseurs, $p = .122$, h de

[13] Aucun des sept enfants de langue maternelle Arabe n'a été identifié comme spatialiseur inverse dans la condition L3 ou L4.

[14] Même si tester la répartition globale entre spatialiseurs gauche-droite, non-spatialiseurs et spatialiseurs inverses est informative, évaluer l'asymétrie entre les deux catégories de spatialiseurs présente un intérêt spécifique. En effet, si l'orientation du codage spatial (gauche-droite ou droite-gauche) était déterminée de manière aléatoire, l'on s'attendrait alors à une répartition symétrique entre ces deux profils opposés. En revanche, un déséquilibre non lié au hasard – en faveur par exemple du profil gauche-droite – traduirait une réelle préférence directionnelle dans la manière de spatialiser l'information en mémoire. Cette analyse restreinte se justifie d'autant plus qu'un résultat significatif au test χ^2 d'ajustement réalisé sur l'échelle globale (gauche-droite, absence d'effet, droite-gauche) pourrait masquer une répartition aléatoire entre les deux profils de spatialiseurs, simplement parce-que ces deux groupes restent plus rares que les non-spatialiseurs. Pour illustrer ce point, des tests binomiaux ont été menés sur les distributions reportées par van Dijck et al. (2020), qui ont réalisé une analyse bootstrap sur différentes études menées chez l'adulte. La réanalyse de ces distributions nous ont permis d'observer une asymétrie en faveur des spatialiseurs gauche-droite significative ($p = .011$, h de Cohen $= 0.66$, pour les données de van Dijck et al., 2013 ; $p < .001$, h de Cohen $= 0.80$, pour les données de van Dijck et Fias, 2011) ou marginale ($p = .062$, h de Cohen $= .56$, pour les données des participants Français et Belges de l'étude de Guida et al., 2018b). Cette asymétrie a également atteint le seuil de significativité pour les données de l'Expérience 5 du présent Chapitre ($p < .001$, h de Cohen $= 0.43$). Une telle préférence n'est par ailleurs pas observée pour l'étude de van Dijck et al. (2020), réalisée auprès d'enfants pré-lecteurs ($p = .356$, h de Cohen $= 0.07$) et pour laquelle aucun effet SPoARC n'avait été détecté au niveau du groupe.

Cohen = 0.14).

Les proportions de spatialiseurs gauche-droite, non-spatialiseurs et spatialiseurs inverses ont ensuite été comparées par groupe d'âge et par longueur (voir la Figure C.12 en Annexe C pour un aperçu des pentes empiriques et des intervalles de confiance calculés pour chaque participant en longueur 3 et en longueur 4). Concernant le groupe de CP, l'analyse bootstrap sur les données en condition L3 a révélé que cinq enfants (16%) pouvaient être qualifiés de spatialiseurs gauche-droite et que six enfants (19%) présentaient une spatialisation inverse (les 65% restants étant non-spatialiseurs). Bien que cette répartition globale ait significativement différé du hasard ($\chi^2(2) = 13.61$, $p = .001$, W de Cohen = 0.66), le test binomial n'a pas révélé d'asymétrie entre les deux profils de spatialiseurs ($\pi = \frac{1}{2}$, 6 spatialiseurs inverses sur 11 spatialiseurs[15], $p = .5$, h de Cohen = .30). Les résultats obtenus en L4 ont montré que la répartition des enfants de CP entre les trois types de spatialisation ne pouvait pas être différenciée d'une répartition aléatoire ($\chi^2(2) = 3.36$, $p = .187$; voir la Figure 3.9 pour un aperçu des proportions obtenues dans cette condition). Un χ^2 de McNemar-Bowker (une extension du test de McNemar aux tables de contingence supérieures à 2×2) a enfin été réalisé dans le but d'évaluer la symétrie des profils de spatialisation d'une longueur de séquence à une autre (le Tableau C.17 en Annexe C présente la matrice de correspondances entre les types de spatialisation observés dans les deux tâches). Les résultats n'ont pas indiqué de variation statistiquement significative entre les deux conditions expérimentales ($\chi^2(3) = 2.11$, $p = .55$).

Concernant les enfants en CE2, l'analyse en condition L3 a montré que 11 enfants (30%) étaient des spatialiseurs gauche-droite et que seulement un enfant (soit 3%) présentait une spatialisation droite-gauche (les 67% restant étant non-spatialiseurs). La répartition des participants entre ces trois catégories s'est avérée différente du hasard ($\chi^2(2) = 22.17$, $p < .001$, W de Cohen = 0.78). De plus, l'asymétrie détectée entre spatialiseurs gauche-droite et droite-gauche s'est avérée différente du hasard également (11 spatialiseurs gauche-droite sur 12 spatialiseurs, $p = .003$, h de Cohen = .70). En revanche, la distribution observée en longueur 4 s'est révélée aléatoire ($\chi^2(2) = 4.5$, $p = .105$, voir la Figure 3.9). Un résultat significatif au χ^2 de McNemar-Bowker a également pu confirmer l'impact de la longueur de la séquence sur la spatialisation observée dans ce groupe d'âge ($\chi^2(3) = 8.07$, $p = .044$, voir le Tableau C.17 en Annexe C).

En CM2, les distributions obtenues pour chaque longueur se sont avérées différentes d'une répartition liée au hasard ($\chi^2(2) = 15.297$, $p < .001$, W de Cohen = 0.64 pour la condition L3 et $\chi^2(2) = 18.54$, $p < .001$, W de Cohen = 0.71 pour la condition L4, voir la Figure 3.9). Les tests binomiaux opposant les spatialiseurs gauche-droite

[15] Le test binomial relatif à ces proportions teste la probabilité d'une occurrence plus forte de spatialiseurs inverses, étant donné qu'ils tendaient à être plus nombreux dans cette condition.

aux spatialiseurs inverses ont montré une asymétrie marginalement significative en condition L3 (10 spatialiseurs gauche-droite sur 14 spatialiseurs, $p = .09$, h de Cohen = 0.31) et significative en condition L4 (10 spatialiseurs gauche-droite sur 13 spatialiseurs, $p = .046$, h de Cohen = 0.40). Aucune variation significative liée à la longueur n'a également pu être mise en évidence ($\chi^2(3) = 2.09$, $p = .554$), révélant des profils assez stables entre les conditions L3 et L4 pour ce groupe d'âge (voir le Tableau C.17 en Annexe C).

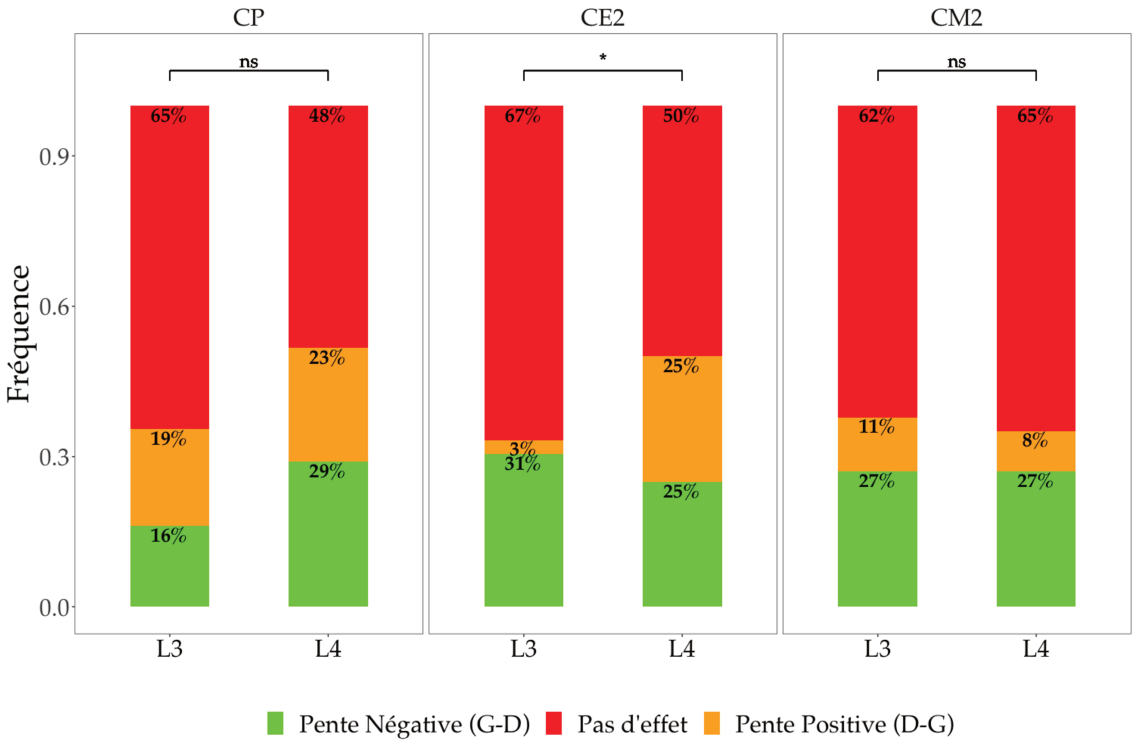


FIGURE 3.9 – Proportions de spatialiseurs gauche-droite, non-spatialiseurs et spatialiseurs droite-gauche en fonction du groupe d'âge et de la longueur de séquence dans l'Expérience 6 *Note.* Les labels *ns* et * indiquent le niveau de significativité obtenu au χ^2 de McNemar-Bowker, qui évalue la symétrie des trois profils de spatialisation d'une longueur de séquence à une autre.

3.3.3.5 Spatialisation et mesures complémentaires

Analyse préliminaire Une dernière série d'analyses a tenté d'investiguer le lien entre l'effet SPoARC, les capacités mnésiques et les aptitudes en lecture/écriture des participants. Pour ce faire, chaque participant s'est vu attribuer un indice de spatialisation, correspondant à la pente minimale obtenue entre les deux longueurs de séquence. Il est à noter que lorsque cette pente minimale référait à une spatialisation significativement positive dans l'analyse bootstrap, le participant était écarté de l'analyse (voir van Dijck et al., 2022, pour une approche similaire). En effet, aucune hypothèse a priori

n'était envisagée pour ces spatialiseurs inverses (e.g., nous supposions par exemple que de meilleures capacités en lecture/écriture favoriseraient l'émergence d'un SPoARC orienté de gauche à droite). Seulement quatre enfants ont été écartés des analyses subséquentes, résultant en un échantillon de 100 participants. En classe de CP, l'indice de spatialisation correspondait à la pente en longueur 3 pour 52% des participants et à la pente de longueur 4 pour les 48% restants. En CE2, la pente était préférentiellement issue de la longueur 3 (61%), tandis que les enfants les plus âgés n'ont pas présenté de longueur préférentielle (49% en L3 et 51% en L4 pour le groupe de CM2).

Le Tableau 3.6 rend compte des statistiques descriptives relatives à l'indice de spatialisation et aux cinq mesures complémentaires effectuées pour l'ensemble des participants (i.e., capacité maximale, exactitude et vitesse pour la lecture, vitesse et graphisme pour l'écriture). Le tableau inclut également les scores bruts en ordre direct et inverse calculés sur le sous-groupe d'enfants pour lequel ces mesures ont pu être administrées[16]. Aucune valeur extrême n'a été retirée pour ces différentes mesures, dans le but de refléter au mieux la diversité des profils et d'explorer plus finement leur lien avec le SPoARC (voir van Dijck et al., 2022). Pour l'ensemble de ces mesures, un effet de l'âge a été investigué par le biais d'une analyse de régression linéaire. Cette analyse a permis d'observer une augmentation significative avec l'âge de la capacité maximale ($t(98) = 4.86$, $p < .001$, $Std.\beta = 0.44$), de l'exactitude en lecture ($t(96) = 7.52$, $p < .001$, $Std.\beta = 0.61$), de la vitesse de lecture ($t(96) = 14.42$, $p < .001$, $Std.\beta = 0.83$), de la vitesse d'écriture ($t(98) = 15.57$, $p < .001$, $Std.\beta = 0.84$), du score en ordre direct ($t(69) = 4.05$, $p < .001$, $Std.\beta = 0.44$) et du score en ordre inverse ($t(69) = 2.05$, $p = .044$, $Std.\beta = 0.24$) ; ainsi qu'une diminution des scores en graphisme (un score élevé indiquant une plus faible habileté grapho-motrice, $t(98) = -6.02$, $p < .001$, $Std.\beta = -0.52$). En revanche, aucun effet de l'âge n'a pu être mis en évidence sur la pente minimale des participants, que ce soit en considérant l'âge sur une échelle continue ($t(98) = 0.21$, $p = .832$, $Std.\beta = 0.02$) ou en considérant le niveau scolaire des enfants ($t(98) = 0.19$, $p = .850$, $Std.\beta = 0.02$)[17]. Des corrélations ont été réalisées entre les scores de mémoire en ordre direct/inverse et la capacité maximale mesurée pendant la tâche. Cette analyse a montré une relation positive entre ces deux mesures et la capacité ($\rho = 0.60, p < .001$ pour le score en ordre direct et $\rho = 0.24, p = .042$ pour le score en ordre inverse, $N = 71$).

[16] Les scores bruts endroit et envers ont ici été préférés aux empans dérivés de la même tâche car ils tendaient à refléter une meilleure variabilité inter-participants, notamment pour l'ordre direct ($CV = 23\%$ pour le score brut et $CV = 20\%$ pour l'empan correspondant).

[17] Aucun effet de l'âge n'a également pu être mis en évidence en considérant uniquement les pentes en L3 ($t(91) = -0.28$, $p = .780$, $Std.\beta = -0.03$ pour l'âge ; $t(91) = -0.49$, $p = .624$, $Std.\beta = -0.05$ pour le niveau scolaire, $N = 93$ suite à l'exclusion des spatialiseurs droite-gauche) ou en L4 ($t(83) = -0.04$,

Tableau 3.6 – Statistiques descriptives de la pente minimale obtenue entre les deux tâches de spatialisation, de la capacité mnésique et des performances en lecture/écriture, pour l'ensemble de l'échantillon et pour chaque groupe d'âge de l'Expérience 6

	Moyenne	ET	Min	Max	*N*	Shapiro-Wilk
Pente minimale	-131.73	154.26	-668.42	186.52	100	.003
CP	-129.20	147.64	-537.28	107.58	30	.085
CE2	-143.17	178.37	-668.42	169.72	34	.046
CM2	-123.02	137.98	-466.48	186.52	36	.572
Capacité maximale	2.49	0.71	0.75	4.00	100	.543
CP	2.09	0.70	0.75	3.12	30	.099
CE2	2.47	0.59	1.41	4.00	34	.552
CM2	2.85	0.66	1.75	3.88	36	.045
Lecture : exactitude	89.49	10.09	57.69	99.25	98	< .001
CP	78.45	11.70	57.69	97.06	28	.223
CE2	93.13	4.87	80.14	98.11	34	< .001
CM2	94.62	4.12	80.09	99.25	36	< .001
Lecture : vitesse	192.60	107.69	15.00	492.63	98	.031
CP	63.64	31.17	15.00	135.00	28	.095
CE2	198.20	56.84	117.00	370.33	34	.003
CM2	287.62	75.67	149.00	492.63	36	.124
Écriture : vitesse	163.80	99.36	30.00	433.00	100	< .001
CP	53.13	17.26	30.00	102.00	30	.005
CE2	157.59	43.30	54.00	261.00	34	.886
CM2	261.75	74.21	121.00	433.00	36	.580
Écriture : graphisme	17.83	8.96	2.00	47.00	100	.003
CP	25.33	8.57	11.00	47.00	30	.399
CE2	15.97	7.53	2.00	38.00	34	.406
CM2	13.33	6.34	4.00	36.00	36	.005
Mémoire : ordre direct	6.94	1.62	4.00	11.00	71	.005
CP	6.12	1.30	4.00	8.00	24	.047
CE2	6.90	1.76	4.00	11.00	21	.289
CM2	7.73	1.43	6.00	11.00	26	.017
Mémoire : ordre inverse	7.48	2.12	4.00	13.00	71	.011
CP	6.79	1.82	4.00	10.00	24	.068
CE2	7.67	1.93	4.00	11.00	21	.085
CM2	7.96	2.41	4.00	13.00	26	.140

Note. ET = Écart-type, Shapiro-Wilk = niveau de significativité au test de normalité de Shapiro-Wilk. La ligne surlignée renvoie aux valeurs calculées sur l'ensemble de l'échantillon. Une pente minimale négative plus forte indique un plus grand effet SPoARC. Les résultats des enfants concernant les mesures d'exactitude en lecture sont généralement proches des normes reportées dans l'Alouette-R (Lefavrais, 2005). En CP, la moyenne observée (i.e., 79) se situe à −0.67 écart-type de la norme reportée pour ce niveau scolaire. Les CE2 se situent très légèrement au-dessus de la norme, avec une moyenne située à +0.17 écart-type. En CM2, la moyenne observée correspond exactement à la norme. Pour la vitesse de lecture, les enfants de CP se situent à −0.18 écart-type de la norme. La moyenne observée en CE2 correspond exactement à la norme, et celle des CM2 est légèrement supérieure, avec une moyenne située à +0.23 écart-type par rapport à la norme. Concernant la vitesse d'écriture, les enfants de CP étaient situés à +0.17 écart-type de la moyenne reportée dans le manuel de la BHK pour leur niveau scolaire (Charles et al., 2004). Les enfants de CE2 étaient légèrement en dessous de la norme (à −0.29 écart-type), tandis que les enfants de CM2 étaient au-dessus de la moyenne du groupe d'âge (à +0.83 écart-type). Concernant le graphisme, l'ensemble des groupes d'âge se situait au-dessus de la moyenne reportée pour chaque niveau scolaire, sans qu'aucun ne dépasse un écart-type (+0.81 pour les CP, +0.84 pour les CE2 et +63 pour les CM2). Pour rappel, des scores plus élevés en graphisme traduisent une qualité d'écriture plus faible.

Lien avec la spatialisation Un modèle linéaire[18] a été ajusté sur l'indice de spatialisation des participants, incluant comme prédicteurs la capacité maximale, les deux indices de lecture ainsi que les deux indices d'écriture. Bien qu'aucun effet global de l'âge n'ait été observé sur l'indice de spatialisation, ce facteur a tout de même été intégré comme variable de contrôle dans la modélisation. Les facteurs d'intérêt étant significativement corrélés entre eux (voir le corrélogramme C.13 en Annexe C), un facteur d'inflation de la variance (VIF, voir Alin, 2010 ; Daoud, 2017 ; Shrestha, 2020) a été calculé pour diagnostiquer une éventuelle multicolinéarité au sein du modèle. Aucun des prédicteurs n'a obtenu de VIF supérieur ou égal à cinq (la littérature indique que des valeurs supérieures à dix sont généralement considérées comme problématiques pour l'estimation des effets ; bien que des valeurs supérieures à cinq doivent déjà être considérées avec prudence, voir James et al., 2013, p.102 ; Marcoulides & Raykov, 2019, p.876 ; Shrestha, 2020, p.40). Les résultats ont montré un effet significatif de la capacité sur l'indice de spatialisation, indiquant que les participants avec une capacité plus faible tendaient à produire un effet SPoARC plus marqué ($t(91) = 3.21$, $p = .002$, $Std.\beta = 0.35$). Aucun autre prédicteur n'a montré d'effet significatif (tous les $|t| \leq 0.77$, tous les $p \geq .45$, tous les $|Std.\beta| \leq 0.17$, voir le Tableau C.18 en Annexe C pour le détail de ces résultats).

L'effet de la capacité maximale sur l'indice de spatialisation a été confirmé par une corrélation partielle contrôlant l'effet de l'âge, permettant d'isoler l'influence de ce facteur sur l'indice de spatialisation des participants ($\rho = 0.32$, $p = .001$, $N = 100$, voir la Figure 3.10). Cette même approche n'a par ailleurs pas permis d'observer de liens significatifs entre l'indice de spatialisation et les autres mesures complémentaires (tous les $|\rho| \leq .07$, tous les $p \geq .48$). Pour préciser la relation entre capacité et spatialisation, des corrélations partielles ont également été conduites sur les données issues d'une même longueur. Cette analyse visait à déterminer si les participants présentant des aptitudes plus faibles pour une longueur donnée tendaient également à spatialiser davantage dans cette même tâche. Une telle relation pourrait suggérer l'existence d'un mécanisme compensatoire, moins directement observable *via* l'étude de la relation entre pente minimale et capacité maximale pour les deux longueurs confondues. L'analyse menée pour la condition L3 a mis en évidence une corrélation positive entre la capacité et la pente de spatialisation ($\rho = 0.26$, $p = .011$, $N = 93$), les participants les plus en difficulté pendant la tâche tendant également à plus spatialiser. En revanche, seul un lien similaire marginalement significatif a été détecté en condition L4 ($\rho = 0.21$, $p = .057$, $N = 85$), cette absence d'effet pouvant néanmoins être imputable à une plus

$p = .968$, $Std.\beta = -0.005$ pour l'âge ; $t(83) = 0.04$, $p = .970$, $Std.\beta = 0.004$ pour le niveau scolaire, $N = 85$ suite à l'exclusion des spatialiseurs droite-gauche).

[18] Bien que la distribution de l'indice de spatialisation ne suive pas strictement une loi normale selon le test de Shapiro-Wilk, un test *fitDist* a montré que ce type de distribution demeurait une approximation adéquate pour modéliser ces données.

petite taille d'échantillon suite à l'exclusion des spatialiseurs inverses.

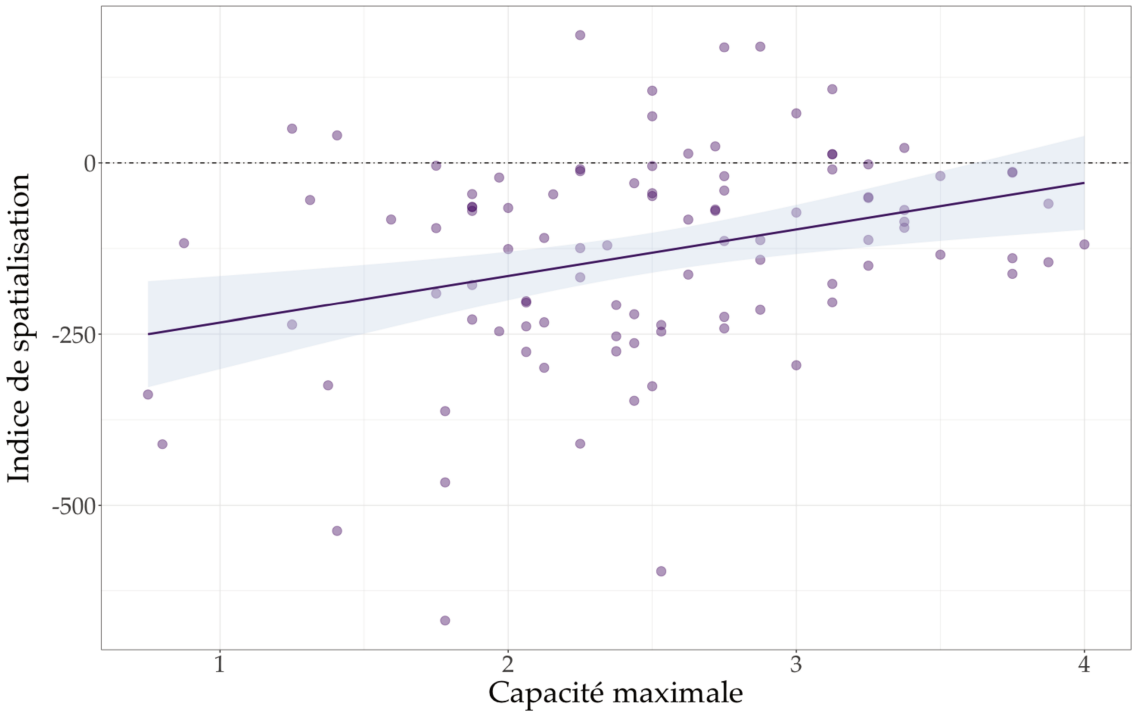


FIGURE 3.10 – Corrélation entre l'indice de spatialisation et la capacité maximale des participants de l'Expérience 6. *Note.* Une indice de spatialisation de plus en plus proche de zéro renvoie à un SPoARC d'une plus faible intensité.

Pour finir, une analyse plus ciblée de la capacité a été conduite auprès des participants ayant pu compléter les tâches d'empan endroit et envers. L'objectif était de déterminer si la variation du SPoARC en fonction des aptitudes mnésiques était spécifiquement imputable au contexte expérimental fourni dans la tâche (i.e., la mémorisation puis la reconnaissance d'une série d'images présentées en modalité visuelle), ou si ce lien persistait lorsque la capacité était estimée dans un domaine plus verbal (i.e., dans une tâche impliquant la rétention puis le rappel de séries de chiffres présentées en modalité auditive). De plus, ces mesures présentent l'avantage d'apprécier plus finement les aptitudes du participant, là où notre estimation de la capacité tend à plafonner à la plus grande longueur de séquence présentée dans la tâche de spatialisation. Un dernier avantage réside dans la possibilité de dissocier les effets liés aux capacités de maintien pur (ordre direct) de ceux associés au traitement de l'information mémorisée (ordre inverse) dans leur relation avec le SPoARC. Un modèle linéaire a été implémenté en intégrant le score endroit et le score envers, ainsi que l'âge comme prédicteurs de la pente minimale des participants (tous les VIFs < 2). Alors qu'aucun effet n'a été remarqué pour la performance en ordre inverse, ($t(67) = -0.97$, $p = .338$, $Std.\beta = -0.13$), un effet à la limite du seuil de significativité a été observé pour l'ordre direct ($t(67) = 1.94$,

$p = .056$, $Std.\beta = 0.29$). La relation entre ce prédicteur et l'effet SPoARC était semblable à celle identifiée pour la mesure de capacité maximale, à savoir une plus forte spatialisation chez les enfants présentant les capacités mnésiques les plus faibles.

3.3.4 Discussion

Cette sixième expérience avait pour objectif de mettre en évidence un SPoARC chez l'enfant par le biais d'un paradigme classiquement implémenté chez l'adulte. Dans cette étude, les participants ont réalisé deux tâches de spatialisation impliquant la mémorisation d'une série d'images, suivie d'une phase de reconnaissance. La longueur de la séquence a été manipulée, de sorte que chaque participant mémorise des séries de trois ou quatre éléments. Cette variation de la taille du mémorandum a permis d'estimer le SPoARC avec une longueur similaire à celle utilisée chez l'adulte (4 items), tout en permettant de comparer son occurrence pour une taille plus adaptée à l'âge des participants (3 items). De manière générale, cette sixième étude indique qu'un SPoARC est détectable chez l'enfant d'âge scolaire, mais que son apparition dépend à la fois du groupe d'âge considéré et du nombre d'items mémorisés lors de la tâche.

Nos résultats chez les enfants les plus âgés – scolarisés en CM2 – ont montré un SPoARC significatif pour des séries de quatre éléments, confirmant la présence d'un traitement spatial des items en fonction de leur position dans la séquence. Pour cette longueur, un avantage notable de la main droite par rapport à la main gauche a pu être détecté pour le dernier item, tandis que les différences de temps de réponse tendaient davantage à être proches de zéro pour les premiers éléments de la série. Un pattern inverse a par ailleurs été observé pour des séries de trois items : bien que le coefficient de la pente globale n'ait pas significativement différé de zéro, cette longueur plus courte a tout de même donné lieu à des temps de réponse significativement plus rapides de la main gauche pour le premier item de la séquence (et marginalement plus rapides pour le deuxième item), comme révélé par l'analyse des différences de temps de réponse entre mains pour chaque position. Cet avantage de la main gauche indique que ces items initiaux ont pu bénéficier d'un codage spatial durant la tâche, suggérant la présence d'un effet SPoARC dans cette condition également. Ainsi, cette sixième expérience a permis de confirmer que l'enfant scolarisé en fin d'école élémentaire tend à spatialiser l'ordre des items qu'il encode en mémoire de travail sous la forme d'une ligne mentale horizontale. Si l'analyse descriptive des pentes de spatialisation pourrait suggérer une variation du SPoARC selon le nombre d'items maintenus en mémoire, l'absence de différence significative entre les deux conditions – que ce soit par la comparaison des coefficients moyens ou des profils de spatialisation issus de l'analyse bootstrap – ne permet pas de conclure avec certitude à une telle modulation. À cet âge, la spatialisation semble ainsi indépendante de la longueur de séquence utilisée lors de la tâche, indiquant

un effet relativement stable quel que soit le nombre d'items maintenus en mémoire.

Par contraste, la variation du nombre d'items dans la séquence s'est révélée critique dans la détection du SPoARC chez l'enfant de CE2. En effet, l'utilisation d'une longueur de séquence généralement proposée chez l'adulte (i.e., quatre items) n'a pas permis d'observer de spatialisation significative pour ce groupe d'âge, quelle que soit l'analyse implémentée pour la mettre en évidence, et indépendamment des performances en mémoire pour cette longueur. En revanche, un effet SPoARC a pu être identifié dans la tâche impliquant la mémorisation de séries de trois items. Cette divergence dans la détection du SPoARC rappelle les résultats de Vivion et al. (2025b), qui ont proposé à leurs participants trois tâches de spatialisation, impliquant respectivement la mémorisation de trois, quatre ou cinq items. La comparaison du SPoARC sous ces différentes conditions a révélé la présence d'un SPoARC d'une plus grande intensité en longueur 4, comparé aux tâches de trois ou cinq items. Suite à ces résultats, les auteurs ont proposé que la variation du SPoARC en fonction de la longueur de la séquence pourrait suivre une trajectoire quadratique. Le codage spatial des items serait le plus saillant pour une longueur de séquence adaptée à la capacité des participants. Chez l'adulte, cette capacité est estimée en moyenne à quatre unités selon Cowan (2001), en cohérence avec la capacité maximale effectivement mesurée chez les participants de Vivion et al. (i.e., 4.1). Pour de plus petites séquences, l'encodage spatial des items s'avérerait moins pertinent, dans la mesure où les éléments peuvent être distingués sans difficulté, rendant superflu le recours à une organisation spatiale. Pour des séquences dépassant la capacité en mémoire, le SPoARC pourrait également perdre en intensité du fait d'un codage moins précis des différentes positions (reflété par exemple par l'augmentation des erreurs de transposition avec la taille de la séquence, Haberlandt et al., 2005 ; Hurlstone & Hitch, 2018), et par conséquent, du fait d'une représentation spatiale plus diffuse de l'ensemble de la séquence. Nos résultats chez l'enfant concordent avec ceux de Vivion et al. (2025b), dans la mesure où l'augmentation de la charge mnésique – provoquée par l'utilisation de séries de quatre items – a empêché l'expression d'un SPoARC chez les élèves de CE2. Dans une tâche plus ajustée à la capacité des participants (estimée à 2.5 en moyenne dans notre étude), un codage spatial de trois items s'est avéré plus directement observable, suggérant que cette longueur pourrait être optimale dans la détection de l'effet à cet âge précis.

De la même manière que chez les enfants de CM2, la variation du nombre d'items en mémoire ne semble pas avoir eu d'impact sur l'émergence du SPoARC chez les enfants scolarisés en CP. Cependant, là où l'effet était détectable sous les deux longueurs chez les enfants les plus âgés, aucune des conditions expérimentales n'a permis l'identification d'un SPoARC gauche-droite significatif chez les enfants les plus jeunes. Même si quelques spatialiseurs gauche-droite ont pu être identifiés par le biais d'une analyse individuelle, ces derniers ne se sont pas avérés être plus fréquents que les spatialiseurs

inverses. De tels résultats s'alignent avec la théorie de l'expertise, qui suggère que l'enfant tendrait à recruter une ligne mentale et y organiser l'information sérielle dans une direction congruente avec ses habitudes de lecture/écriture une fois ces activités pleinement maîtrisées. Dans nos résultats, le SPoARC a justement pu être détecté à ce stade du développement (i.e., en CE2), un traitement gauche-droite s'étant révélé suffisamment marqué chez les participants pour que la pente de spatialisation négative soit détectable au niveau du groupe. Pourtant, là où la théorie de l'expertise impliquerait un lien direct entre spatialisation et niveau de maîtrise dans le langage écrit (i.e., des individus plus experts en lecture-écriture seraient également plus à même de spatialiser l'information), une telle relation n'a pas pu être identifiée dans nos résultats. À l'inverse, le SPoARC était davantage expliqué par la capacité en mémoire, de plus faibles aptitudes étant liées à une spatialisation plus marquée en mémoire de travail (une relation que nous discutons plus amplement dans la Discussion Intermédiaire de ce chapitre).

Cependant, là où la présente étude a tenté de mettre en évidence une relation *linéaire* entre le SPoARC et les capacités de lecture/écriture, il est possible que ce type de relation ne reflète pas fidèlement la nature de leur interaction. En effet, la lecture/écriture pourrait tout aussi bien agir comme un seuil critique dans le développement du SPoARC : des différences entre bons et mauvais lecteurs/scripteurs seraient particulièrement visibles dans les premiers stades de l'apprentissage (i.e., entre le CP et le CE2), reflétant l'influence graduelle des compétences dans le langage écrit sur le recours à une spatialisation en mémoire. Cette influence pourrait ensuite atteindre un plateau une fois ces compétences consolidées, la variation de l'effet à des âges plus avancés (i.e., au-delà du CE2) n'étant plus dépendante du niveau de lecture/écriture. Il convient de noter qu'une analyse ciblée sur les enfants de CP et CE2 a été menée à titre exploratoire sur les données de la présente étude, sans révéler de patterns différents des résultats présentés pour l'ensemble de l'échantillon (i.e., un lien significatif entre capacité et spatialisation). Cependant, rappelons que l'utilisation d'une longueur optimale s'est avérée critique dans la détection de l'effet dans le groupe de CE2, le SPoARC n'ayant pas pu être observé pour une longueur dépassant de loin la capacité maximale des participants. En ce sens, il ne peut être exclu que l'utilisation de séries de trois et quatre items ait constitué un frein méthodologique dans la détection de l'effet en CP, dont la capacité a été estimée à 2.1 éléments en moyenne. Ainsi, une tâche plus ajustée à cette capacité pourrait constituer une condition optimale pour mesurer plus précisément la spatialisation à cet âge. Pour cette raison, l'Expérience 7 propose d'investiguer l'effet SPoARC à l'aide de séquences de deux items, en ciblant l'analyse aux enfants de CP et de CE2. Une telle manipulation permettra d'observer si l'absence d'un SPoARC significatif gauche-droite identifié en CP dans la présente étude persiste lorsque la tâche ne dépasse plus les limites de la mémoire de travail, tout

en permettant, sur le plan individuel, une estimation plus sensible de la spatialisation et de son lien potentiel avec le langage écrit.

3.4 Expérience 7

3.4.1 Objectif

L'objectif de cette septième étude était d'investiguer l'émergence d'un effet SPoARC chez l'enfant de CP et de CE2 par le biais de séries de deux à trois items. Cette manipulation expérimentale visait à s'assurer que l'absence d'effet chez l'enfant de CP dans l'Expérience 6 ne résultait pas d'une tâche trop exigeante sur le plan mnésique. En effet, les résultats chez l'enfant de CE2 ont permis l'identification d'un effet SPoARC lorsque les séquences mémorisées correspondaient sensiblement à la capacité des participants (i.e., une tâche à trois items). Une telle spatialisation n'était pas visible lorsque la taille de la séquence dépassait cette capacité (i.e., quatre items), l'accumulation de ces informations ayant pu surcharger la mémoire et empêcher l'élaboration d'une représentation spatiale stable des items. Parce que la capacité maximale des participants de CP a été estimée à environ deux items dans l'Expérience 6, une spatialisation plus marquée pourrait être observée dans une tâche impliquant la mémorisation de seulement deux éléments. À l'inverse, une tâche plus coûteuse (correspondant à la tâche de longueur 3 dans la présente étude) ne devrait pas permettre la détection d'un effet SPoARC, en accord avec nos résultats précédents.

Avec l'avancée en âge, nous supposons que des séries de deux items sont moins propices à la détection de l'effet. Ainsi, nous nous attendons à ce que les participants scolarisés en CE2 manifestent un effet SPoARC peu marqué – voire inexistant – dans la tâche de longueur 2. En raison d'une plus grande capacité à cet âge (e.g., estimée à 2.6 éléments en moyenne dans l'Expérience 6), nous supposons que le codage spatial de seulement deux items, facilement distinguables en mémoire, s'avérerait dans ce cas superflu. Par contraste, la tâche à trois items devrait révéler une spatialisation maximale, en accord avec les résultats observés dans l'Expérience 6. En proposant des longueurs plus à mêmes d'optimiser la détection de l'effet dans ces deux groupes d'âges (i.e., L2 en CP et L3 en CE2), cette septième étude pourrait donc permettre une estimation plus fine des indices de spatialisation des participants. À l'aide de ces mesures, nous tenterons premièrement de confirmer le lien entre capacité mnésique et spatialisation déjà identifié dans l'Expérience 6. Ces nouvelles mesures pourraient également permettre l'identification d'un lien entre langage écrit et spatialisation en mémoire, que nous supposons être particulièrement saillant dans les premières années du cycle élémentaire.

3.4.2 Méthode

3.4.2.1 Participants

Cette étude a été réalisée auprès d'un échantillon de 72 enfants. Parmi ces élèves, un seul a été écarté en raison d'un trouble sévère du langage. L'échantillon final regroupait un total de 36 participants scolarisés en CP (âge moyen = 6.5 ans, ET = 0.37 ans) et 35 élèves scolarisés en CE2 (âge moyen = 8.4 ans, ET = 0.32 ans). Ces 71 participants présentaient tous une vision normale ou corrigée et ne présentaient aucun trouble moteur, cognitif ou psychique connu. L'échantillon regroupait un total de 35 filles et 36 garçons ; 59 des participants étaient droitiers, et sur l'ensemble des élèves, 62 étaient de langue maternelle française. Les neuf participants restants étaient respectivement de langue maternelle albanaise, arabe, bulgare, grecque, italienne, roumaine (N = 2), tamoul et tchétchène. Les élèves ont été rencontrés au sein de deux établissements publics de la ville de Nice entre le premier et le deuxième trimestre de l'année scolaire.

3.4.2.2 Matériel et procédure

Tâche de spatialisation Les stimuli utilisés dans les tâches de spatialisation de cette étude étaient similaires à ceux présentés dans l'Expérience 6. Chaque tâche comprenait 64 séquences, réparties en deux blocs homogènes. Chaque bloc était associé à l'une des deux sessions expérimentales, qui différaient par l'assignation des réponses « oui » et « non » à une main donnée. Les séquences présentées dans la tâche à trois items étaient similaires à celles utilisées dans l'Expérience 6.

De nouvelles séquences ont été élaborées pour la tâche à deux items. Chacun des huit stimuli a été présenté un nombre équivalent de fois à chaque position dans la phase de mémorisation (i.e., quatre fois par position et par session, soit huit fois par position sur l'ensemble de la tâche). Chaque fruit a également été présenté un nombre équivalent de fois dans la phase de reconnaissance. Le nombre d'items cibles et d'items leurres était équitable au sein de chaque session expérimentale, pour un total de 16 cibles et 16 leurres par session, soit 32 occurrences pour chaque type de sonde sur l'ensemble de la passation. Parmi les items cibles, un nombre équivalent de tests a été administré pour des items placés en première et en deuxième position (8 fois par session, pour un total de 16 tests par position sur la totalité de la tâche).

Des ajustements ont été apportés à la tâche de spatialisation, dans le but de renforcer l'engagement des participants les plus jeunes. Les consignes ont été explicitées, les mots de vocabulaire simplifiés et des exemples visuels ont été insérés afin de mieux préparer les participants aux exigences de la tâche (voir la Figure C.14 en Annexe C).

Un fil narratif a été proposé afin d'assurer une continuité entre les différentes sessions expérimentales, et de maintenir l'intérêt des participants jusqu'au bout de la procédure. Les enfants étaient informés qu'ils devaient secourir un protagoniste égaré dans l'espace, et qu'ils disposaient d'un vaisseau spatial pour mener à bien leurs recherches. À la manière de van Dijck et al. (2020), un feedback (d'une durée de 3000 ms) était également donné à l'issue de chaque réponse (voir la Figure C.15 en Annexe C). Une réponse correcte permettait aux enfants d'accumuler de l'énergie pour alimenter leur vaisseau (une boule de feu était présentée au centre de l'écran, accompagnée de la mention « Bravo ! » et d'un signal sonore agréable). Dans le cas contraire, des feedbacks différents étaient présentés pour dissocier les réponses incorrectes (un émoticône triste, accompagné de la mention « Dommage ! Essaie encore ! » et d'un signal sonore indiquant une erreur) d'une absence de réponse (un panneau d'alerte, accompagné de la mention « Oups ! Essaie d'être plus rapide ! » et d'un signal sonore neutre).

Pour encourager les performances, la tâche a également été ponctuée d'images récompenses, représentant différents univers dans lesquels les participants pouvaient chercher le protagoniste. Ces illustrations affichées en plein écran et accompagnées d'une ambiance sonore étaient programmées pour être présentées à la suite des essais n° 1, 8, 16, 24 et 32 (les essais 8, 16 et 24 correspondant sensiblement aux moments auxquels une pause était proposée aux participants de l'Expérience 6). Ces illustrations restaient visibles à l'écran jusqu'à ce que l'expérimentateur ne clique sur la souris. Pour permettre une cohérence dans l'apparition des feedbacks positifs, ces récompenses n'étaient présentées que lorsque l'essai correspondait à une réponse correcte. Si une réponse incorrecte était donnée à ces essais critiques, la présentation de l'image était repoussée à l'essai suivant jusqu'à ce que le participant donne une bonne réponse.

Le déroulement des passations était similaire à celui de l'Expérience 6. Les participants ont été rencontrés sur quatre sessions expérimentales : les deux premières sessions correspondaient à la tâche de longueur 2 pour la moitié des participants, et à la tâche de longueur 3 pour l'autre moitié de l'échantillon. Pour chaque longueur, ces deux sessions correspondaient à une assignation réponse/main différente (e.g., oui/main gauche pour la première session et oui/main droite pour la deuxième, contrebalancé entre les participants). Dans l'idéal, ces sessions étaient réalisées à horaires fixes et étaient réparties sur quatre jours consécutifs (i.e., lundi et mardi pour la première tâche de spatialisation, et jeudi et vendredi pour la deuxième tâche). Lorsque les conditions de passation ne permettaient pas un tel équilibre, il a été fait en sorte que deux sessions consécutives soient espacées d'a minima quelques heures. Une fois la tâche de spatialisation achevée, la session expérimentale était clôturée par la réalisation d'une mesure complémentaire (écriture, lecture ou mémorisation), dont l'ordre d'assignation variait entre les participants.

Mesures complémentaires Le niveau de lecture, d'écriture et la capacité mnésique des participants ont été estimés de la même manière que pour l'Expérience 6. L'*Alouette* (Lefavrais, 2005, 1967) a permis le calcul d'un score d'exactitude et d'un score de vitesse en lecture. Par ailleurs, huit participants de CP n'ont pas été en mesure de lire les deux premiers noms communs du texte de l'Alouette (i.e., « mousse » et « toit »). En accord avec les consignes du manuel, la lecture des voyelles et des syllabes inscrites en bas de la planche illustrée a été proposée à ces participants. Les scores d'exactitude et de vitesse n'étant pas calculables pour ces élèves, le niveau de lecture a été estimé sur la base d'un âge lexique – calculé en fonction du nombre de voyelles et syllabes correctement lues – à partir de l'étalonnage fourni dans la première version du test. Cet âge lexique a également été estimé pour le reste des participants sur la base de leur score réel de lecture (i.e., tenant compte du temps de lecture et du nombre d'erreurs commises) en vue d'une analyse complémentaire permettant d'inclure l'ensemble des participants. Le test de la *BHK* (Charles et al., 2004) a permis l'estimation d'un score de graphisme et d'un score de vitesse d'écriture. La capacité maximale atteinte par les participants sur l'ensemble des deux tâches de spatialisation a été retenue comme indice principal de l'efficience mnésique. En complément de cet indice, une mesure d'empan endroit et envers a été réalisée pour l'ensemble des participants à l'aide du subtest *Mémoire des chiffres* de la WISC-V (Wechsler, 2016).

3.4.3 Résultats

3.4.3.1 Analyses préliminaires

Taux de réussite La performance moyenne pour la tâche de longueur 2 était égale à .91 (ET = .06, min = .67, max = .98). La performance pour la longueur 3 était légèrement plus basse, avec une moyenne de .90 (ET = .07, min = .63, max = 1). Une ANOVA à deux facteurs (Longueur × Groupe d'âge) a révélé que cette différence était statistiquement significative, les participants ayant mieux réussi la tâche de longueur 2 quel que soit leur âge ($F(1, 69) = 6, p = .017, \eta^2_p = .08$). Un effet du groupe d'âge a également été identifié : quelle que soit la longueur, les performances étaient généralement plus hautes pour les enfants de CE2 comparés aux enfants de CP ($m_{CP} = .89$, $ET = .07$; $m_{CE2} = .93$, $ET = .05$, $F(1, 69) = 10.17, p = .002, \eta^2_p = .128$). L'interaction entre les deux facteurs s'est révélée uniquement marginale ($F(1, 69) = 2.71, p = .104, \eta^2_p = .038$, voir le Tableau C.19 en Annexe C pour un aperçu des proportions de bonnes réponses pour chaque groupe et chaque longueur). L'analyse restreinte aux items cibles (i.e., des items présents dans la séquence mémorisée) a conduit au même pattern de résultats.

Temps de réponse Les temps de réponse ont été winsorisés pour chaque longueur séparément. En condition L2, 5% des temps de réaction ont été transformés. Le temps de réponse moyen dans cette condition expérimentale était de 1276 ms ($ET = 445$ ms) ; le temps de réponse par groupe d'âge était en moyenne de 1384 ms pour les CP ($ET = 416$ ms) et de 1169 ms pour les CE2 ($ET = 388$ ms). En condition L3, 4.8% des temps de réaction ont été winsorisés. Le temps de réponse moyen pour cette longueur était de 1362 ms ($ET = 463$ ms). La moyenne observée en CP était de 1472 ms ($ET = 492$ ms), contre 1257 ms ($ET = 407$ ms) en CE2. Aucune tendance significative à privilégier la vitesse au détriment de l'exactitude n'a été observée dans les deux conditions ($\rho = -0.11, p = .366$ en condition L2 et $\rho = -0.17, p = .155$ en condition L3).

3.4.3.2 Effet de spatialisation : Modèles mixtes linéaires généralisés

Les mêmes modèles mixtes généralisés que ceux implémentés pour l'Expérience 6 ont été élaborés pour cette étude, et une distribution Gamma a été utilisée comme référence pour l'analyse des temps de réponse (la distribution des temps de réponse est visible sur la Figure C.16 en Annexe C). Les modèles mixtes ont été élaborés sur la base de deux facteurs aléatoires (Item et Sujet), deux facteurs de contrôle (Numéro d'essai et Session expérimentale) et quatre facteurs d'intérêt (Main, Position, Longueur et Groupe d'âge ; voir le Tableau C.20 en Annexe C pour un récapitulatif de ces modèles).

Le modèle classé premier dans la table d'AIC était le modèle $M9$, qui ne capturait aucun effet caractéristique de la spatialisation ($M9 \longleftarrow$ TR $\sim$ Position $\times$ Groupe d'âge + Main + Longueur + Essai + Session + (1|I) + (1|S)). Les modèles intégrant des effets liés au SPoARC ont été classés respectivement 3ème ($M14$, interaction Position $\times$ Main $\times$ Groupe d'âge), 10ème ($M15$, interaction Position $\times$ Main $\times$ Longueur), 11ème ($M8$, Position $\times$ Main) et 12ème ($M18$, interaction Position $\times$ Main $\times$ Groupe d'âge $\times$ Longueur) ; voir le Tableau C.21 en Annexe C pour le classement d'AIC. Aucune différence significative n'a été identifiée entre le premier modèle et le modèle $M14$, classé en troisième position ($\chi^2(3) = 3.33$, $p = .343$). Cependant, aucune différence n'était également visible entre le premier modèle et le modèle $M15$, classé dixième ($\chi^2(3) = 0.38$, $p = .945$). De ce fait, le modèle le plus parcimonieux ($M9$) a été retenu comme reflétant le mieux les données de cette étude.

Le modèle $M9$ a permis de rendre compte d'un effet principal du facteur Position sur les temps de réaction ($\beta = -89.16$, $ES = 5.55$, $t(4103) = -16.06$, $p < .001$, $Std.\beta = -26.06$). Un effet principal du groupe d'âge a également été repéré, les enfants de CE2 étant globalement plus rapides que les enfants de CP ($m_{CP} = 1427$ ms, $ET = 457$ ms *vs.* $m_{CE2} = 1213$ ms, $ET = 400$ ms ; $\beta = -275.91$, $SE = 7.15$, $t(4103) = -38.59$, $p < .001$, $Std.\beta = -106.62$). Les participants tendaient également à répondre plus

rapidement de leur main droite que de leur main gauche (m_D = 1303 ms, ET = 440 ms, m_G = 1333 ms, ET = 443 ms ; $\beta = 33.28$, $SE = 4.61$, $t(4103) = 7.22$, $p < .001$, $Std.\beta = 33.28$). Un effet de la longueur a été identifié, montrant que les participants étaient significativement plus rapides en longueur 2 qu'en longueur 3 ($\beta = 94.24$, $SE = 5.68$, $t(4103) = 16.61$, $p < .001$, $Std.\beta = 94.24$; voir les analyses préliminaires pour le détail des temps de réponse). Une interaction significative entre la position de l'item et le groupe d'âge a également été identifiée, la diminution des temps de réponse en fonction de la position étant plus marquée chez les CP ($\beta_{CP} = -53.7$) que chez les CE2 ($\beta_{CE2} = -18.3$, $\beta = 35.45$, $SE = 4.07$, $t(4103) = 8.71$, $p < .001$, $Std.\beta = 12.92$).

De la même manière que pour l'Expérience 6, la variable position a été recodée afin de refléter la place *relative* de chaque item par rapport à la longueur de la séquence. Une échelle commune allant de -1 à 1 a été utilisée pour les deux longueurs, aboutissant aux valeurs -1 et 1 pour les deux positions de la condition L2, et les valeurs -1, 0 et 1 pour les trois positions de la condition L3. Cet ajustement n'a pas abouti à un meilleur classement des modèles impliquant une spatialisation, ces derniers ayant été classés respectivement 4ème ($M14$, interaction Position × Main × Groupe d'âge), 9ème ($M8$, Position × Main), 11ème ($M15$, interaction Position × Main × Longueur) et 12ème ($M18$, interaction Position × Main × Groupe d'âge × Longueur). L'analyse des temps de réponse n'a donc pas permis de mettre en évidence des patterns caractéristiques d'un effet SPoARC dans l'échantillon.

3.4.3.3 Effet de spatialisation par régression linéaire

Longueur de 2 items L'absence d'effet identifiée dans l'analyse basée sur les modèles mixtes a été davantage éprouvée *via* l'analyse des différences de temps de réponse entre les deux mains. Pour la tâche à deux items, les d_{TR} se sont avérées augmenter de 20 ms entre la position 1 et la position 2, sans que cette pente ne diffère significativement de zéro ($d_{TR-P1} = -6$ ms, ET = 223 ms ; d_{TR-P2} = 14 ms, ET = 251 ms ; $t(70) = 0.69$, $p = .494$, $Std.\beta = 0.04$). L'analyse par position n'a pas non plus révélé qu'une d_{TR} moyenne différait significativement de zéro (tous les $|t| \leq 0.47$, tous les $p \geq 0.64$, tous les $|d|$ de Cohen ≤ 0.06).

L'analyse par groupe d'âge n'a pas non plus permis d'observer un effet SPoARC significatif quel que soit le niveau scolaire considéré. En CP, les d_{TR} moyennes étaient positives, avec une augmentation de 41 ms par position, suggérant qu'une spatialisation de droite à gauche aurait pu être à l'œuvre pour ce groupe d'âge. Cependant, la pente de régression associée n'a pas atteint le seuil de significativité (d_{TR-P1} = 10 ms, ET = 244 ms ; d_{TR-P2} = 51 ms, ET = 234 ms ; $t(35) = 1.00$, $p = .325$, $Std.\beta = 0.09$). L'analyse par position n'a pas non plus révélé qu'un item en particulier avait bénéficié d'un traitement spatial durant la tâche (tous les $|t| \leq 1.30$, tous les $p \geq 0.20$, tous les

$|d|$ de Cohen ≤ 0.22). En CE2, les d_{TR} moyennes étaient négatives, et ne tendaient pas à varier entre les deux positions ($d_{TR-P1} = –22$ ms, $ET = 201$ ms ; $d_{TR-P2} = –24$ ms, $ET = 267$ ms ; $t(34) = -0.03$, $p = .975$, $Std.\beta = -0.001$). Aucun résultat significatif n'a également émergé de l'analyse exécutée sur chaque position (tous les $|t| \leq 0.66$, tous les $p \geq 0.52$, tous les $|d|$ de Cohen ≤ 0.11).

Longueur de 3 items Pour la tâche à trois items, les trois d_{TR} moyennes se sont avérées négatives ($d_{TR-P1} = –57$ ms, $ET = 327$ ms ; $d_{TR-P2} = –27$ ms, $ET = 359$ ms ; $d_{TR-P3} = –41$ ms, $ET = 292$ ms). La pente de régression n'a pas différé significativement de zéro, que ce soit en tenant compte de l'ensemble des positions ($\beta = 8.28$, $t(139.946) = 0.43$, $p = .666$, $Std.\beta = 0.02$) ou en cantonnant l'analyse aux positions extrêmes ($\beta = 16.56$, $t(70) = 0.46$, $p = .651$, $Std.\beta = 0.03$). L'analyse par position n'a pas non plus révélé de résultats significatifs (tous les $|t| \leq 1.48$, tous les $p \geq 0.14$, tous les $|d|$ de Cohen ≤ 0.18). Cette absence d'effet global s'est confirmée dans l'analyse par groupes d'âge. Aucun SPoARC n'a pu être identifié chez les enfants de CP, et ce en tenant compte de l'ensemble des positions ($\beta = 14.55$, $t(70.03) = 0.50$, $p = .62$, $Std.\beta = 0.03$), des positions extrêmes ($\beta = 29.09$, $t(35.00) = 0.48$, $p = .634$, $Std.\beta = 0.04$) ou en analysant chaque position séparément (tous les $|t| \leq 0.79$, tous les $p \geq 0.43$, tous les $|d|$ de Cohen ≤ 0.13). De manière plus inattendue, la tâche à trois items n'a pas permis de répliquer l'effet SPoARC identifié dans l'Expérience 6 en CE2 ($\beta = 1.83$, $t(69) = 0.07$, $p = .942$, $Std.\beta = 0.006$). Cette absence d'effet a persisté dans l'analyse restreinte aux positions extrêmes ($\beta = 3.67$, $t(34) = 0.09$, $p = .929$, $Std.\beta = 0.008$) ou lorsque chaque position était considérée séparément (tous les $|t| \leq 1.58$, tous les $p \geq 0.12$, tous les $|d|$ de Cohen ≤ 0.27). La Figure 3.11 illustre à titre indicatif les pentes obtenues pour chaque longueur et chaque groupe d'âge.

Un test t de Student pour échantillons appariés a enfin été conduit pour évaluer l'effet de la longueur de séquence sur les pentes de spatialisation moyennes des participants. Les résultats ont indiqué que les pentes moyennes ne différaient pas entre la condition L2 et L3, tant chez les élèves de CP ($m_{L2} = 40.80$, $ET = 245$, $m_{L3} = 14.55$, $ET = 182$; $t(35) = 0.55$, $p = .584$, d de Cohen $= 0.12$) que chez les CE2 ($m_{L2} = -1.31$, $ET = 248$, $m_{L3} = 1.83$, $ET = 120$; $t(34) = -0.07$, $p = .942$, d de Cohen $= -0.02$).

3.4.3.4 Effet de spatialisation : Bootstrap

L'absence d'effet observée au niveau du groupe a été plus amplement investiguée en considérant la fiabilité des pentes individuelles dans chaque condition, d'abord sur l'ensemble des participants, puis pour chaque groupe d'âge séparément. Sur l'ensemble de l'échantillon, la tâche de longueur 2 a conduit à l'identification de 11 spatialiseurs

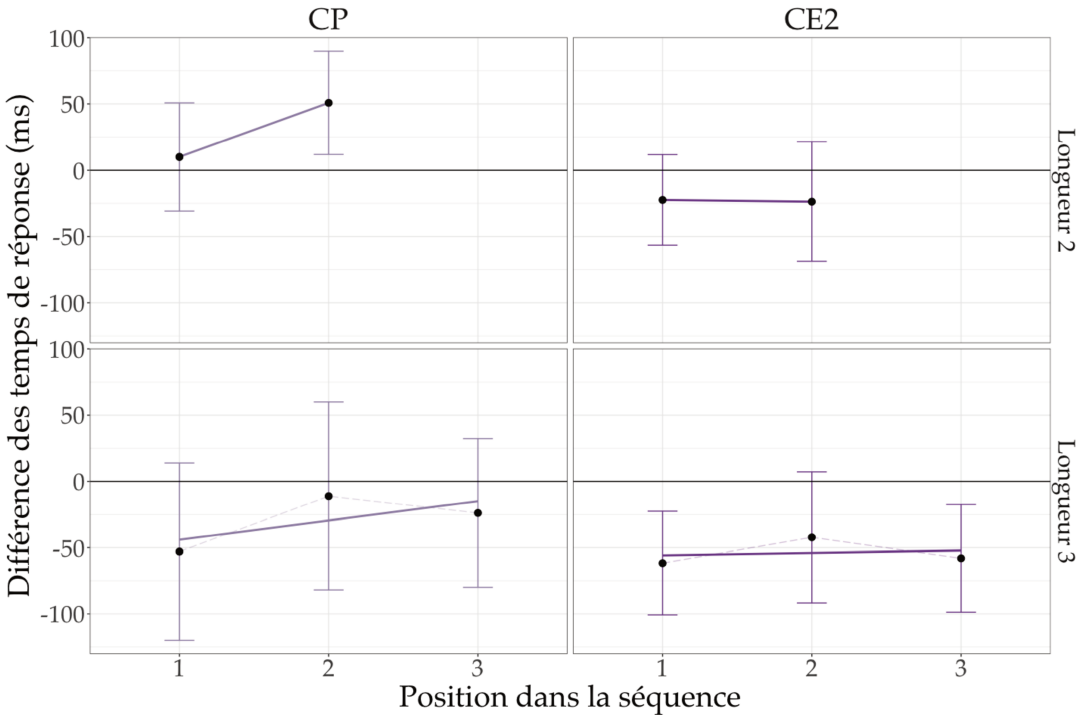


Figure 3.11 – Régression linéaire de la différence des temps de réponse moyens (d_{TR}) entre main droite et main gauche en fonction de la position de l'item, du groupe d'âge et de la longueur de la séquence mémorisée pour l'Expérience 7. *Note.* La figure a été réalisée sur les données agrégées par position et par sujet, et les barres d'erreur correspondent à ± 1 Erreur Standard.

gauche-droite (15%), 16 spatialiseurs inverses (23%)[19] et 44 participants qui ne présentaient aucune spatialisation (62%). Cette répartition entre spatialiseurs gauche-droite, spatialiseurs inverses et non-spatialiseurs s'est avérée significativement différente d'une répartition aléatoire ($\chi^2(2) = 26.73$, $p < .001$, W de Cohen = 0.61). La distribution indiquant une surreprésentation de spatialiseurs inverses, un test binomial a été effectué pour déterminer si ces derniers étaient significativement plus nombreux que les spatialiseurs gauche-droite. Les résultats n'ont pas permis de statuer sur une asymétrie significative entre les deux profils de spatialisation (16 spatialiseurs inverses sur 27 spatialiseurs, $p = .22$). Des résultats identiques ont été observés pour la longueur 3, dans laquelle 9 participants ont été identifiés comme spatialiseurs gauche-droite (13%), 10 participants comme spatialiseurs inverses (14%), les 52 participants restants (73%) ayant été identifiés comme non-spatialiseurs. Cette répartition s'est avérée significativement différente d'une distribution liée au hasard ($\chi^2(2) = 50.90$, $p < .001$, W de Cohen = 0.85). La légère asymétrie en faveur des spatialiseurs inverses ne s'est

[19] Le participant de langue maternelle arabe n'a pas montré de spatialisation inverse quelle que soit la longueur de la séquence.

pas avérée statistiquement significative (10 spatialiseurs inverses sur 19 spatialiseurs, $p = .5$).

L'analyse a ensuite été conduite pour chaque groupe d'âge séparément, mettant en évidence des patterns de résultats similaires à ceux observés pour l'ensemble de l'échantillon. En CP, la répartition des participants entre les trois catégories (gauche-droite, droite-gauche ou absence d'effet) a différé significativement du hasard ($\chi^2(2) = 15.5$, $p < .001$, W de Cohen = 0.66, voir la Figure 3.12 pour un aperçu des proportions). Le test opposant spatialiseurs gauche-droite et spatialiseurs inverses n'a pas permis de différencier les deux profils (8 spatialiseurs inverses sur 13 spatialiseurs, $p = .291$). La condition L3 a également conduit à des proportions différentes du hasard en considérant les trois types de spatialisation ($\chi^2(2) = 12.5$, $p = .002$, W de Cohen = 0.59). Cependant, des proportions équivalentes ont été identifiées entre les spatialiseurs gauche-droite et les spatialiseurs inverses (7 spatialiseurs gauche-droite sur 14 spatialiseurs, $p = .605$). Aucune influence de la longueur n'a été identifiée pour ce groupe d'âge, la répartition des participants entre les trois types de spatialisation demeurant stable entre les deux conditions expérimentales ($\chi^2(3) = 0.51$, $p = .916$). Le Tableau C.22 en Annexe C reporte la matrice de correspondance entre les trois profils de spatialisation d'une longueur à une autre.

L'analyse effectuée sur les enfants de CE2 a conduit à des résultats similaires. En condition L2, la distribution entre les trois types de spatialisation était significativement différente d'une distribution aléatoire ($\chi^2(2) = 11.37$, $p = .003$, W de Cohen = 0.57, voir la Figure 3.12). Cependant, aucune préférence en faveur d'un traitement gauche-droite n'a été identifiée (8 spatialiseurs inverses sur 14 spatialiseurs, $p = .40$). De la même manière, la répartition des participants entre les trois catégories de spatialisation a différé du hasard en condition L3 ($\chi^2(2) = 43.26$, $p < .001$, W de Cohen = 1.11). Seule une faible proportion de spatialiseurs a été identifiée dans cette condition expérimentale (14% contre 40% en condition L2), lesquels n'ont par ailleurs pas traité l'information dans un sens préférentiel, comme attesté par un test binomial non significatif (3 spatialiseurs inverses sur 5 spatialiseurs, $p = .5$). Par ailleurs, l'analyse opposant les distributions identifiées en longueur 2 et en longueur 3 n'a pas permis d'observer une différence significative entre les conditions expérimentales ($\chi^2(3) = 6.17$, $p = .103$). Le Tableau C.22 en Annexe C reporte la matrice relative aux enfants de CE2.

3.4.3.5 Spatialisation et mesures complémentaires

Analyse préliminaire Le lien entre spatialisation, capacité mnésique et niveau de lecture/écriture a enfin été investigué dans une série d'analyses. De même que pour l'Expérience 6, un indice de spatialisation a été retenu pour chaque participant, correspondant à la pente minimale obtenue entre les deux tâches. Les participants pour qui

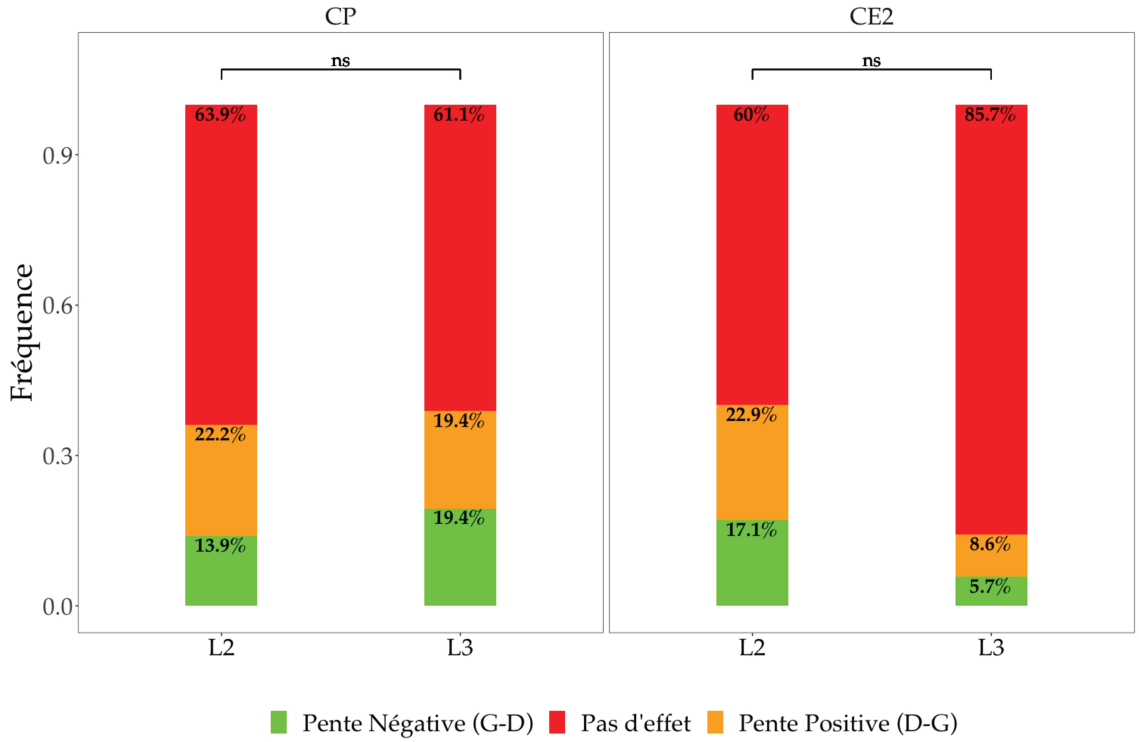


Figure 3.12 – Proportions de spatialiseurs gauche-droite, non-spatialiseurs et spatialiseurs droite-gauche en fonction du groupe d'âge et de la longueur de la séquence dans l'Expérience 7 *Note*. Les labels *ns* indiquent le niveau de significativité obtenu au χ^2 de McNemar-Bowker, qui évalue la symétrie des trois profils de spatialisation d'une longueur de séquence à une autre.

cette pente correspondait à une spatialisation inverse dans l'analyse bootstrap ont été écartés de l'analyse, résultant en un échantillon de 68 participants. La pente minimale était issue de la longueur 2 pour 45% des élèves de CP et pour 49% des élèves de CE2.

Le Tableau 3.7 reporte les statistiques descriptives relatives à l'indice de spatialisation des participants, ainsi qu'aux différentes mesures de langage écrit (score d'exactitude, score de vitesse et âge lexique pour la lecture ; score de vitesse et de graphisme pour l'écriture) et de capacité mnésique (capacité maximale, score brut en ordre direct et score brut en ordre inverse). Un effet de l'âge a été évalué pour chaque mesure complémentaire par le biais d'une régression linéaire. Cette analyse a permis d'observer une augmentation significative avec l'âge de l'exactitude en lecture ($t(60) = 6.45$, $p < .001$, $Std.\beta = 0.64$), de la vitesse de lecture ($t(60) = 5.19$, $p < .001$, $Std.\beta = 0.56$), de l'âge lexique ($t(66) = 5.33$, $p < .001$, $Std.\beta = 0.55$), de la vitesse d'écriture ($t(66) = 13.32$, $p < .001$, $Std.\beta = 0.85$), de la capacité maximale ($t(66) = 4.08$, $p < 001$, $Std.\beta = 0.45$), du score en ordre direct ($t(66) = 3.02$, $p = .004$, $Std.\beta = 0.35$) et du score en ordre inverse ($t(66) = 3.42$, $p = .001$, $Std.\beta = 0.39$) ; ainsi qu'une diminution des scores en graphisme (un score élevé indiquant une plus faible habileté grapho-motrice,

$t(66) = -10.94$, $p < .001$, $Std.\beta = -0.80$). Aucun effet de l'âge n'a pu être mis en évidence sur l'indice de spatialisation des participants, que ce soit en considérant l'âge sur une échelle continue ($t(66) = 0.38$, $p = .709$, $Std.\beta = 0.05$) ou sur une échelle numérique discrète reflétant le niveau scolaire des enfants ($t(66) = 0.21$, $p = .836$, $Std.\beta = 0.03$) [20]. Les corrélations réalisées entre les scores de mémoire en ordre direct/inverse et la capacité maximale mesurée pendant la tâche ont montré une relation positive significative entre les mesures ($\rho = .31, p = .01$ pour le score en ordre direct et $\rho = .40, p < .001$ pour le score en ordre inverse, $N = 68$).

Lien avec la spatialisation De la même manière que dans l'Expérience 6, un modèle linéaire a été ajusté sur l'indice de spatialisation des participants en incluant comme prédicteurs les mesures de lecture (vitesse et exactitude), d'écriture (vitesse et graphisme), de capacité mnésique (capacité maximale, score brut en ordre direct et en ordre inverse) et l'âge chronologique. Les résultats n'ont pas permis d'observer d'effet significatif, que ce soit pour les mesures de lecture (tous les $|t| \leq 0.80$, tous les $p \geq .43$, tous les $|Std.\beta| \leq 0.20$) d'écriture (tous les $|t| \leq 0.50$, tous les $p \geq .62$, tous les $|Std.\beta| \leq 0.16$) ou de mémorisation (tous les $|t| \leq 0.71$, tous les $p \geq .48$, tous les $|Std.\beta| \leq 0.11$, voir le Tableau C.23 en Annexe C pour le détail des statistiques relatives à ce modèle). Le modèle présentant par ailleurs un risque modéré de multicolinéarité (VIFs > 5 pour la vitesse d'écriture et pour l'âge ; voir le corrélogramme C.17 en Annexe C pour un aperçu des corrélations observées entre les scores), un deuxième modèle a été effectué en excluant la vitesse d'écriture (la conservation de facteurs de contrôle présentant des VIF élevés restant une approche valide, voir Allison, 2012). Ce modèle restreint a sensiblement conduit aux mêmes résultats (tous les $|t| \leq 0.80$, tous les $p \geq 0.41$, tous les $|Std.\beta| \leq 0.20$).

Les mêmes modèles ont ensuite été testés en tenant compte de l'âge lexique à la place des mesures d'exactitude et de vitesse de lecture. Une telle démarche visait à tenir compte des participants pour lesquels les scores d'exactitude et de vitesse ne pouvaient pas être calculés. Ces modèles n'ont pas abouti non plus à des effets significatifs, que ce soit en incluant la vitesse d'écriture (tous les $|t| \leq 1.08$, tous les $p \geq 0.29$, tous les $|Std.\beta| \leq 0.16$, voir le Tableau C.23 en Annexe C pour un détail des résultats), ou en tenant ce facteur hors de la modélisation pour limiter la multicolinéarité des prédicteurs (tous les $|t| \leq 1.09$, tous les $p \geq 0.28$, tous les $|Std.\beta| \leq 0.17$). Le corrélogramme C.18 en Annexe C reporte les corrélations observées entre l'âge lexique et les autres prédicteurs.

Pour confirmer ces résultats, des corrélations partielles entre l'indice de spatialisation et les mesures de lecture, d'écriture et de capacité ont été effectuées en maintenant

[20] Aucun effet de l'âge n'a également pu être mis en évidence en considérant uniquement les pentes en L2 ($t(53) = -0.41$, $p = .681$, $Std.\beta = -0.06$ pour l'âge ; $t(53) = -0.67$, $p = .505$, $Std.\beta = -0.09$ pour le niveau scolaire ; $N = 55$, suite à l'exclusion des spatialiseurs droite-gauche) ou en L3 ($t(59) = 1.18$,

Tableau 3.7 – Statistiques descriptives de la pente minimale obtenue entre les deux tâches de spatialisation, de la capacité mnésique et des performances en lecture/écriture, pour l'ensemble de l'échantillon et pour chaque groupe d'âge de l'Expérience 7

	Moyenne	ET	Min	Max	*N*	Shapiro-Wilk
Pente minimale	-106.69	162.76	-609.76	149.00	68	.008
CP	-110.94	160.30	-431.97	149.00	33	.159
CE2	-102.68	167.29	-609.76	122.06	35	.021
Capacité maximale	2.51	0.33	1.66	3.00	68	.001
CP	2.38	0.34	1.66	2.91	33	.052
CE2	2.64	0.26	2.06	3.00	35	.006
Lecture : exactitude	79.36	16.31	37.10	98.11	62	< .001
CP	65.75	15.59	37.10	92.73	27	.502
CE2	89.85	5.59	72.55	98.11	35	.027
Lecture : vitesse	125.40	94.08	10.00	382.30	62	.001
CP	58.04	78.07	10.00	369.08	27	< .001
CE2	177.30	69.58	74.00	382.31	35	.017
Âge lexique	7.44	1.19	5.92	12.17	68	< .001
CP	6.72	0.72	5.92	10.08	33	< .001
CE2	8.11	1.15	6.75	12.17	35	< .001
Écriture : vitesse	96.54	65.69	19.00	247.00	68	< .001
CP	38.00	12.77	19.00	65.00	33	.175
CE2	151.74	43.43	61.00	247.00	35	.574
Écriture : graphisme	23.29	9.22	5.00	40.00	68	.030
CP	30.76	6.33	19.00	40.00	33	.045
CE2	16.26	4.97	5.00	24.00	35	.209
Mémoire : ordre direct	6.71	1.56	4.00	10.00	68	.004
CP	6.09	1.51	4.00	10.00	33	.016
CE2	7.29	1.38	5.00	10.00	35	.036
Mémoire : ordre inverse	6.77	1.71	2.00	12.00	68	.006
CP	6.03	1.49	2.00	9.00	33	.007
CE2	7.46	1.63	5.00	12.00	35	.009

Note. ET = Écart-type, Shapiro-Wilk = niveau de significativité au test de normalité de Shapiro-Wilk. La ligne surlignée renvoie aux valeurs calculées sur l'ensemble de l'échantillon. Une pente minimale plus négative indique un effet SPoARC plus fort. Pour la lecture, les enfants de CP ont présenté un score d'exactitude moyen en dessous de la norme rapportée dans l'Alouette-R pour ce niveau scolaire (−2.11 écarts-types). Un plus faible écart a été détecté pour le score de vitesse (−0.32 écart-type), et l'âge lexique (6.7) était légèrement supérieur à l'âge chronologique moyen des participants (6.5). En CE2, le score d'exactitude et le score de vitesse se sont avérés inférieurs à la norme (−0.5 et −0.31 écart-type respectivement). L'âge lexique (8.1) s'est révélé également légèrement inférieur à l'âge chronologique moyen (8.4). Concernant l'écriture, les enfants de CP ont obtenu un score de vitesse situé à −0.44 écart-type de la norme. Un écart plus important a été observé pour le score de graphisme, lequel se situait à +1.65 écart-type de la norme (un score élevé indiquant un graphisme de faible qualité). En CE2, le score moyen de vitesse s'est avéré inférieur à la norme (−0.42), et le score en graphisme s'est révélé supérieur (+0.84).

l'âge des participants constant. Ces corrélations n'ont pas permis d'observer un lien significatif entre l'indice de spatialisation et les différentes mesures (tous les $|\rho| \leq .10$, tous les $p \geq .43$). Au-delà de l'absence de lien entre spatialisation et lecture/écriture préalablement constatée dans l'Expérience 6, le lien entre capacité mnésique et spatialisation mis en évidence dans cette même étude (y compris lorsque seuls les enfants de CP et de CE2 étaient sélectionnés, $\rho = .31, p = .014$) n'a pas pu être répliqué dans cette septième expérience. La même analyse a tenté d'étudier si un tel lien pouvait être plus directement observable sur les données issues d'une même longueur, mais les résultats n'ont montré aucun lien significatif ($\rho = .06, p = .659$ pour la longueur 2, $N = 55$ après exclusion des spatialiseurs inverses ; et $\rho = .01, p = .999$ pour la longueur 3, $N = 61$ après exclusion des spatialiseurs inverses).

Pour approfondir l'absence d'effet observée dans les analyses précédentes, une analyse *k-means* a été réalisée sur les indices de spatialisation des participants. Cette méthode visait à regrouper les participants en deux clusters présentant à la fois une homogénéité intra-groupe et une hétérogénéité inter-groupe maximale concernant leur pente de spatialisation. Pour le premier cluster (C1, forte spatialisation), l'indice de spatialisation moyen était de -324.63 ($ET = 98.1$, $N = 19$). Pour le cluster C2 (faible spatialisation), l'indice de spatialisation moyen était de -22.18 ($ET = 85.3$, $N = 49$)[21]. Une fois ces clusters définis, des comparaisons intergroupes ont été effectuées pour identifier les critères sur lesquels les participants pouvaient différer de manière significative (i.e., âge chronologique, niveau de lecture, d'écriture ou capacité mnésique). Ces comparaisons ont été effectuées à l'aide d'un test t de Student, ou par le biais d'un U de Mann-Whitney lorsque la distribution des scores de lecture/écriture/capacité mnésique différait d'une loi normale dans au moins un des deux clusters.

Le Tableau 3.8 reporte les moyennes observées entre les deux sous-groupes pour chacun des scores considérés. Les résultats n'ont pas indiqué que les participants des deux clusters différaient significativement selon leur âge chronologique ($U = 392.5$, $p = .322$, $r = 0.12$), ou leur niveau de lecture ($U = 326$, $p = .377$, $r = 0.11$ pour l'exactitude, $U = 315$, $p = .291$, $r = 0.14$ pour la vitesse et $U = 393.5$, $p = .324$, $r = 0.12$ pour l'âge lexique). Les scores d'écriture ne différaient également pas entre

$p = .242$, $Std.\beta = 0.15$ pour l'âge ; $t(59) = 1.00$, $p = .319$, $Std.\beta = 0.13$ pour le niveau scolaire ; $N = 61$, suite à l'exclusion des spatialiseurs droite-gauche).

[21] Cette approche dichotomique rappelle la méthode utilisée par van Dijck et al. (2022), qui consistait à opposer les participants sur la base de leur profils bootstrap (i.e., spatialiseurs gauche-droite et non-spatialiseurs). Ici, l'approche par analyse *k-means* a été préférée, pour fonder la classification des participants davantage sur la magnitude de leur pente minimale plutôt que sur leur stabilité. Lorsque les participants étaient répartis selon l'approche de van Dijck et al. (2022), des tailles de cluster sensiblement proches à celles de l'analyse *k-means* ont été identifiées, bien que les moyennes des indices de spatialisation différaient entre les deux classifications ($N_{\text{Spat-GD}} = 20$, $m = -289.52$, $ET = 118.1$; $N_{\text{Non-spat}} = 48$, $m = -30.51$, $ET = 109.4$ pour le regroupement entre spatialiseurs gauche-droite et non-spatialiseurs).

les deux sous-groupes ($t(66) = 0.01$, $p = .991$, d de Cohen $= .01$ pour le graphisme et $U = 360$, $p = .151$, $r = .18$ pour les scores de vitesse), ni les scores de mémorisation en ordre inverse ($U = 402.5$, $p = .381$, $r = 0.11$).

Tableau 3.8 – Moyennes (et écart-type) de l'âge chronologique, des mesures de lecture/écriture et des performances mnésiques entre les deux clusters identifiés par l'analyse *k-means* de l'Expérience 7

Variable	Forte spatialisation (C1)		Faible spatialisation (C2)	
Âge lexique	7.33	(1.27)	7.48	(1.17)
Lecture - Exactitude	75.57	(17.89)	80.79	(15.65)
Lecture - Vitesse	109.94	(102.79)	131.19	(91.11)
Écriture - Graphisme	23.32	(9.82)	23.29	(9.08)
Écriture - Vitesse	82.68	(63.24)	101.92	(66.46)
Capacité maximale	2.38	(0.40)	2.56	(0.28)
Mémoire - ordre direct	6.16	(1.38)	6.92	(1.58)
Mémoire - ordre inverse	6.63	(1.98)	6.82	(1.62)
Âge chronologique	7.32	(1.07)	7.53	(1.05)

En revanche, bien que non significative, une tendance a été identifiée pour la capacité maximale, les participants présentant une plus forte spatialisation (C1) étant ceux qui présentaient aussi une plus faible capacité ($m_{C1} = 2.38$, $ET = 0.40$ *vs.* $m_{C2} = 2.56$, $ET = 0.28$; $U = 341$, $p = .089$, $r = 0.21$), en cohérence avec les résultats de l'Expérience 6. De plus, une autre tendance marginale a également été relevée pour le score de mémorisation en ordre direct, les participants présentant des scores de mémorisation plus faibles tendant également à présenter des indices de spatialisation de plus grande magnitude ($m_{C1} = 6.16$, $ET = 1.38$ *vs.* $m_{C2} = 6.92$, $ET = 1.58$; $U = 332.5$, $p = .064$, $r = 0.23$)[22].

Comparaison entre les élèves de CE2 de l'Expérience 6 et de l'Expérience 7

À titre exploratoire, une dernière analyse a enfin tenté de distinguer les participants scolarisés en CE2 de la présente étude et ceux de l'étude précédente sur la base de leur âge chronologique, de leur niveau en lecture (score d'exactitude et de vitesse), d'écriture (score de graphisme et de vitesse) et de leur capacité mnésique (estimée par la capacité mesurée pendant la tâche à trois items, ainsi que par le score de mémoire en ordre direct et le score en ordre inverse). Cette analyse visait à explorer les facteurs les plus

[22] Les tendances marginales identifiées dans cette analyse se sont révélées significatives lorsque les participants de la présente étude étaient groupés avec les participants de l'Expérience 6 ($t(166) = -4.28$, $p < .001$, d de Cohen $= -0.72$ pour la capacité maximale ; $U = 1455.5$, $p = 0.013$, $r = 0.21$ pour l'ordre direct). Cette analyse groupée n'a par contre pas permis de mettre en évidence d'effets significatifs relatifs au niveau de lecture ou d'écriture, que ce soit en considérant l'ensemble des participants des deux études (tous les $p \geq .55$, tous les $|r|$ et tous les $|d| \leq 0.05$), ou seulement les groupes scolarisés en CP et en CE2 (tous les $p \geq 0.47$, tous les tous les $|r|$ et tous les $|d|| \leq 0.07$). Le Tableau C.24 en Annexe C reporte les moyennes observées entre les clusters de ces deux analyses groupées.

susceptibles d'expliquer les différences observées dans la manifestation du SPoARC entre les deux échantillons. Des comparaisons de moyennes entre les deux groupes ont été effectuées à l'aide de t de Student ou de U de Mann-Whitney lorsque la variable dépendante différait d'une loi normale.

Les résultats ont tout d'abord confirmé la présence d'une différence significative entre les pentes de spatialisation des deux échantillons. À longueur de séquence égale (i.e., trois items), les coefficients des participants de l'Expérience 6 étaient en moyenne de plus grande magnitude que ceux de l'Expérience 7 ($m_{\text{EXP6}} = -82.75$, $ET = 214.60$ *vs.* $m_{\text{EXP7}} = 1.83$, $ET = 120.09$; $t(55.27) = -2.06$, $p = .044$, d de Cohen $= -0.49$). Les résultats ont également montré une différence dans l'âge moyen des participants, les enfants de CE2 de l'Expérience 6 étant plus avancés en âge que ceux de l'Expérience 7 ($m_{\text{EXP6}} = 8.75$, $ET = 0.31$ *vs.* $m_{\text{EXP7}} = 8.44$, $ET = 0.32$; $U = 959$, $p < .001$, $r = 0.45$). Bien que plus âgés, les participants de l'Expérience 6 présentaient néanmoins une capacité mnésique (mesurée dans la tâche de spatialisation) significativement inférieure aux participants de l'Expérience 7 ($m_{\text{EXP6}} = 2.20$, $ET = 0.42$ *vs.* $m_{\text{EXP7}} = 2.64$ ms, $ET = 0.26$ ms ; $U = 256$, $p < .001$, $r = 0.51$). Cette différence n'a pas été relevée lorsque les participants étaient comparés sur la base de leurs performances aux tâches de mémorisation en ordre direct ($U = 334.5$, $p = .272$, $r = 0.15$) ou inverse ($U = 475$, $p = .244$, $r = 0.15$)[23]. Les participants ne différaient pas sur le plan de l'écriture, que ce soit pour la vitesse ($t(69) = 0.38$, $p = .704$, d de Cohen $= 0.09$) ou pour la qualité du graphisme ($t(60.78) = 0.01$, $p = .989$, d de Cohen $= 0.003$, voir le Tableau C.25 en Annexe C pour un détail des moyennes et écarts-types de chaque échantillon). Pour la lecture, aucune différence n'a été relevée pour le score de vitesse ($U = 749$, $p = .173$, $r = 0.16$). Par ailleurs, les scores d'exactitude en lecture se sont avérés différer significativement entre les deux échantillons, les participants de l'Expérience 6 présentant de meilleures performances que ceux de l'Expérience 7 ($m_{\text{EXP6}} = 92.69$, $ET = 5.10$ *vs.* $m_{\text{EXP7}} = 89.85$ ms, $ET = 5.59$ ms ; $U = 851$, $p = .011$, $r = 0.30$).

Pour vérifier si les écarts significatifs observés entre les deux échantillons sur les mesures de capacité et d'exactitude en lecture n'étaient pas simplement liés aux différences d'âge observées entre les participants, des corrélations partielles ont été effectuées en maintenant l'âge des élèves constant. Ces corrélations ont été exécutées sur une variable dépendante binaire, codée 1 (i.e., « succès ») quand les participants appartenaient à la tâche dans laquelle un SPoARC a été détecté, ou zéro (i.e., « échec ») quand les participants appartenaient à la tâche n'ayant pas permis sa détection. Ces corrélations ont montré que la probabilité d'appartenir au groupe « détection du SPoARC » dépendait de la capacité des participants, y compris après contrôle de l'âge ($\rho = -0.46, p <$

[23] Il convient de rappeler que ces mesures étaient néanmoins manquantes pour 13 enfants de CE2 dans l'Expérience 6, réduisant la taille de l'échantillon à 58 participants au lieu de 71 pour les autres mesures.

$.001, N = 71$). La même analyse s'est révélée également significative pour les scores d'exactitude en lecture. À âge comparable, les participants présentant un score plus élevé pour ce critère étaient plus susceptibles d'appartenir au groupe « détection du SPoARC » qu'au groupe « échec de la détection » ($\rho = 0.24, p = .045, N = 71$). Pour affiner ce dernier résultat, une corrélation a été réalisée non plus sur une variable binaire (modélisant simplement l'occurrence du SPoARC à l'échelle du groupe), mais sur les pentes des participants pour la longueur 3 (modélisant la magnitude de l'effet pour chaque individu). L'analyse corrélationnelle a montré que la variation des pentes de spatialisation pour la longueur 3 des participants de l'Expérience 6 et de l'Expérience 7 dépendait du score d'exactitude, un meilleur niveau d'exactitude en lecture étant associé à une plus forte spatialisation de gauche à droite, et ce même après contrôle de l'âge ($\rho = -0.26, p = .036, N = 67$ après exclusion des spatialiseurs inverses).

3.4.4 Discussion

L'objectif de cette septième étude était d'étudier l'émergence de l'effet SPoARC par le biais de séries de deux et de trois items, en centrant l'analyse sur les enfants de CP et de CE2. En proposant une tâche susceptible de détecter l'effet à ce stade développemental, nous espérions mesurer plus finement le lien entre spatialisation et niveau de lecture/écriture, dans la mesure où ce lien n'a pas pu être mis en évidence dans l'Expérience 6. En CP, nous nous attendions à ce que des séries de deux items soient plus propices à l'apparition d'un SPoARC, là où l'Expérience 6 n'avait pas permis de détecter une spatialisation à l'aide de séries de trois à quatre items. Alors que la présente étude a confirmé la non-détection du SPoARC en longueur 3, l'utilisation de séries plus courtes n'a pas permis de détecter une spatialisation à l'échelle du groupe. Ces résultats indiquent que la détection de l'effet ne tend pas à être favorisée par l'utilisation d'une longueur spécifique à ce stade du développement, dans la mesure où le SPoARC est demeuré absent quel que soit le nombre d'items mémorisés par les participants (i.e., deux, trois ou quatre items en considérant les résultats de nos deux études). Ainsi, la trajectoire quadratique envisagée pour rendre compte de l'application d'une spatialisation en mémoire (i.e., un effet maximal pour des longueurs ajustées à la capacité moyenne des participants, et une spatialisation faible, voire absente, pour des longueurs de séquences en deçà ou au-delà de cette capacité) ne semble pas visible chez l'enfant scolarisé en début d'école élémentaire. L'absence d'effet, robuste à la variation de la longueur des séquences, suggère à l'inverse que le recours à une ligne mentale horizontale ne constitue pas encore un mécanisme adopté par l'enfant de six ans lorsqu'il maintient temporairement des informations verbales en mémoire. Cependant, cette interprétation mérite une nuance, dans la mesure où cette septième étude a néanmoins permis de mettre en évidence la présence de quelques spatialiseurs, malgré le fait que

ces derniers n'aient pas spatialisé l'information dans un sens préférentiel, en accord avec les résultats de l'Expérience 6.

Cette septième étude visait également à évaluer la variation de l'effet SPoARC entre des séries de deux et de trois items chez l'enfant de CE2. Les résultats de l'Expérience 6 pour ce niveau scolaire ont montré que les participants tendaient à spatialiser l'information en mémoire uniquement lorsqu'ils maintenaient des séries de trois items, le SPoARC n'ayant pas été détecté pour des séries de quatre éléments. L'hypothèse d'un effet quadratique en fonction du nombre d'items dans la séquence laissait envisager que des séries de deux items pouvaient produire un effet plus faible (ou absent) à cet âge. Nos résultats tendent à confirmer notre hypothèse concernant la tâche de longueur 2, étant donné qu'aucun SPoARC n'a pu être identifié dans cette condition expérimentale. Un tel résultat s'oppose à ceux de Guida et al. (2020b), qui avaient pu observer une spatialisation chez des élèves scolarisés en CE2 par le biais d'un protocole impliquant également la mémorisation de deux items. Il convient néanmoins de souligner que leur paradigme différait de la tâche de spatialisation proposée dans la présente étude. Dans leur protocole, les participants devaient encoder deux noms d'animaux énoncés oralement par l'expérimentateur (e.g., « chien » et « chat »). Les participants devaient ensuite rappeler la séquence mémorisée, puis indiquer quel emplacement correspondait le mieux à un animal cible (e.g., « chien ») en choisissant parmi l'une des deux grottes visibles du côté gauche et du côté droit de l'écran. En observant des réponses congruentes avec une association premier/gauche et deuxième/droite chez les participants, les auteurs ont proposé que les deux éléments avaient pu être encodés sous la forme d'une ligne mentale orientée de gauche à droite pendant la phase de mémorisation. Au moment du test, les deux grottes visibles à l'écran constitueraient alors des indices visuels qui se superposeraient aux marqueurs spatiaux déjà assignés aux deux items en mémoire de travail. La correspondance entre ces indices spatiaux visuels et ces coordonnées spatiales mentales conduirait alors les participants à assigner l'item « chien » (premier élément de la séquence) à la grotte située à gauche de l'écran, car la position spatiale de la grotte serait congruente avec la position de l'item sur la ligne mentale. Les résultats de notre septième étude pourraient nuancer cette interprétation, étant donné qu'une telle spatialisation n'a pas été détectée pour une même longueur de séquence dans notre protocole. À la différence de l'étude de Guida et al. (2020b), la présente expérience n'offrait aucun étayage visuel, que ce soit pendant l'encodage ou pendant la phase de test. Ainsi, il pourrait être envisagé que l'assignation de marqueurs spatiaux à l'information mémorisée dans l'étude de Guida et al. (2020b) n'ait pas véritablement eu lieu au moment de l'encodage comme le proposaient les auteurs, mais uniquement lorsque les deux grottes étaient présentées dans l'espace physique des participants (l'information mémorisée ayant pu être ré-associée spatialement à ce

moment précis). En l'absence de ces repères visuels externes dans notre étude, l'application d'un traitement spatial aux deux éléments mémorisés ne s'est pas avéré. Ce traitement plus implicite (i.e., non étayé par de l'information spatiale au moment du test) pourrait alors survenir préférentiellement lorsque la charge en mémoire est suffisamment exigeante pour rendre son usage pertinent, sans toutefois excéder un seuil au-delà duquel la représentation spatiale des items serait compromise. Une telle interprétation concorde avec l'identification d'un SPoARC dans l'Expérience 6 pour des séries de trois items – une charge mentale probablement suffisamment exigeante pour qu'un traitement spatial soit mobilisé – et la disparition de l'effet pour des séries de quatre items – plus susceptibles de pertuber le système cognitif et d'engendrer du bruit. Pour autant, l'effet n'a pas pu être répliqué dans la tâche à trois items proposée aux enfants de CE2 de cette septième étude, interrogeant la robustesse du phénomène à cet âge précis.

La non-réplication du SPoARC sous des séries de trois items dans la présente expérience constitue un résultat inattendu, dans la mesure où nous proposions que cette condition expérimentale serait justement la plus propice pour la détection de l'effet chez l'enfant en CE2. De prime abord, ce résultat pourrait indiquer que la spatialisation de l'information sérielle en mémoire n'est pas un mécanisme suffisamment stable à ce stade développemental pour se manifester de manière consistante entre différents échantillons comparables. Cependant, il convient de souligner que les deux échantillons en question présentaient des disparités à plusieurs niveaux. Tout d'abord, les élèves de l'Expérience 6 étaient significativement plus âgés que ceux de l'Expérience 7, d'environ quatre mois en moyenne. Rappelons également que les deux échantillons ont été rencontrés à des périodes scolaires distinctes (entre le deuxième et le troisième trimestre pour l'Expérience 6, et entre le premier et le deuxième trimestre pour l'Expérience 7). Ainsi, il peut être permis d'avancer que les enfants de l'Expérience 6, pour qui un SPoARC était observable à l'échelle du groupe, ont pu présenter de meilleures compétences scolaires que les participants de l'Expérience 7, notamment concernant leur niveau de langage écrit. Une telle proposition tend à être étayée par nos résultats, dans la mesure où les enfants de l'Expérience 7 présentaient de plus faibles scores d'exactitude en lecture que les participants de l'Expérience 6. Pour rappel, ces scores rendent compte de la capacité du lecteur à décoder sans erreurs des mots écrits. Il s'avère que ces scores sont connus pour connaître un gain significatif entre le CE1 et le CE2, l'évolution de l'exactitude étant moins marquée à partir de huit ans (Lefavrais, 2005). Cette avancée rapide dans l'exactitude en lecture à l'entrée du CE2 reflète une amélioration notable de la précision du décodage, rendue possible notamment grâce à l'automatisation des correspondances grapho-phonémiques. Cette automatisation permet alors à l'enfant de lire efficacement la plupart des mots de la langue, signant une transition dans un mode de lecture plus expert.

Le fait que les enfants de CE2 de la présente étude aient été rencontrés en début d'année, et que leurs scores d'exactitude se sont avérés inférieurs à la norme observée pour ce niveau scolaire (soit -0.3 écart-type en considérant l'ensemble des participants) peut suggérer un plus faible niveau d'automatisation de la lecture chez ces participants. Par contraste, une performance légèrement au-dessus de la norme observée chez les enfants de CE2 de l'Expérience 6 (soit à $+0.17$ écart-type) indique une plus grande expertise dans cet échantillon. Le fait qu'un SPoARC ait été observé chez ces individus plus experts pourrait étayer l'hypothèse du rôle du langage écrit (et plus précisément ici, de l'automatisation des compétences en lecture) sur l'émergence d'une spatialisation en mémoire de travail. Un autre trait à souligner concerne le fait que ce critère semble relié non seulement à l'occurrence du SPoARC au niveau du groupe, mais également à la magnitude de l'effet, comme suggéré par la corrélation significative – indépendamment de l'effet de l'âge – entre les coefficients de spatialisation des participants en longueur 3 et leurs scores d'exactitude. Une telle relation semble par ailleurs exclusive à ce niveau scolaire. Aucune relation entre l'exactitude en lecture et la spatialisation n'a par exemple été identifiée en considérant uniquement les participants en CP de la présente étude, ou lorsque ces derniers étaient groupés aux participants de CP de l'Expérience 6. Un tel lien n'était pas non plus visible dans les données de l'Expérience 6, que ce soit en considérant l'ensemble des participants (CP, CE2 et CM2), ou pour chaque niveau scolaire pris isolément. Ce n'est qu'en considérant les données des deux groupes de CE2 qu'un effet sur la pente pour une même longueur de séquence a pu être détecté. Pris dans leur ensemble, ces résultats suggèrent que des changements significatifs pourraient opérer au cours de la dernière année du cycle élémentaire, notamment sur le plan de l'exactitude en lecture, et que des compétences plus élevées dans ce domaine pourraient participer à l'émergence d'un SPoARC à l'échelle du groupe chez l'enfant âgé de huit ans. Cependant, nous proposons que cette interprétation soit considérée avec prudence dans la mesure où la tâche utilisée entre les deux échantillons présentait des disparités méthodologiques, lesquelles auraient pu également influencer l'application d'une spatialisation en mémoire.

Dans cette septième expérience, une adaptation du protocole a été mise en œuvre dans le but de rendre la situation expérimentale plus attrayante pour les participants. Dès lors, il ne peut être exclu que la différence entre ce protocole et celui de l'Expérience 6 puisse constituer un facteur confondu dans les variations de l'effet observées entre les deux échantillons. Pour rappel, la tâche de l'Expérience 7 comportait trois modifications principales : l'adaptation des consignes pour instaurer un contexte ludique, l'ajout d'un feedback après la réponse des participants et l'ajout d'images-récompenses intermédiaires au cours de la tâche. Pris ensemble, ces ajustements auraient pu impacter la motivation et l'engagement des participants envers la tâche, des critères qui auraient pu contribuer à une amélioration des performances mnésiques. Bien que ces

facteurs motivationnels ne puissent pas être directement quantifiés dans nos résultats (e.g., aucune mesure qualitative de l'intérêt et de la motivation des participants n'a été réalisée entre les deux études), l'idée qu'un protocole ludique puisse favoriser l'engagement des participants, tout en leur permettant d'atteindre de meilleures performances reste supportée par la littérature. Une revue élaborée par Lumsden et al. (2016) a par exemple montré que des tâches destinées à mesurer ou entraîner différentes fonctions cognitives sont effectivement perçues comme plus motivantes et plus plaisantes par les participants lorsqu'elles revêtent un aspect ludique, contrairement à des tâches expérimentales plus formelles. De meilleures performances à diverses tâches cognitives suite à l'ajout d'une récompense – correspondant dans notre étude aux images intermédiaires et au feedback positif donné au participant – ont également pu être identifiées dans différents travaux. Padmala et Pessoa (2011) ont par exemple montré que la performance à une tâche d'attention sélective de type Stroop pouvait être grandement facilitée lorsque les participants étaient prévenus que l'essai pouvait rapporter un gain. Un plus faible taux d'erreurs et des temps de réponse plus courts étaient observés pour ces essais récompensés, en comparaison à des essais qui ne rapportaient aucun gain aux participants. Libby et Lipe (1992) ont également mis en évidence de meilleures performances dans une tâche de rappel libre lorsque les participants recevaient une récompense pour chaque item correctement reporté. Dans une tâche mesurant les performances de rotation mentale chez des enfants de six à neuf ans, Zakrzewski et al. (2025) ont enfin montré qu'un contexte ludique améliorait significativement la performance des participants, quel que soit l'âge ou le genre des enfants.

Nos données peuvent également suggérer que de meilleures performances ont été atteintes dans la tâche de spatialisation de cette septième étude en comparaison à l'Expérience 6. En effet, les participants de CE2 rencontrés dans l'Expérience 7 ont obtenu un taux de réussite plus élevé ($p < .001$), présentaient des temps de réponse significativement inférieurs ($p < .001$) et ont atteint une capacité mnésique supérieure aux participants de l'Expérience 6, même après contrôle de l'âge ($p < .001$). Or, il s'avère que de meilleures aptitudes sur le plan mnésique tendent à être associées à une plus faible spatialisation chez l'enfant, comme montré dans les résultats de l'Expérience 6 (et de la présente étude, dans une dimension plus modérée). Ainsi, une autre interprétation possible est que, à longueur de séquence comparable, la réalisation d'une tâche présentant des aspects ludiques et favorisant la motivation de l'enfant (Expérience 7) ait été moins coûteuse cognitivement que la tâche plus monotone de l'Expérience 6. En effet, de par son aspect répétitif et l'absence d'un feedback permettant au participant d'ajuster sa performance, le protocole de l'Expérience 6 aurait pu favoriser une fatigue générale, un plus grand ennui ou une perte d'intérêt face à la tâche, des facteurs pouvant potentiellement fragiliser la mémorisation. En considérant la spatialisation comme un mécanisme compensatoire et fonctionnel, émergeant préférentiellement face à des

difficultés mnésiques, l'application d'un codage spatial semble alors plus probable face à une tâche monotone, car il faciliterait le maintien des items en dépit d'une fatigue cognitive ou d'une instabilité attentionnelle. Par contraste, l'application d'une spatialisation s'avérerait moins critique lors d'une tâche plus engageante pour l'enfant : bien qu'un nombre équivalent d'items soit maintenu en mémoire, un contexte ludique aurait pu permettre aux participants d'atteindre une meilleure performance, réduisant la nécessité de coder spatialement l'ordre des items pour mener à bien la tâche de manière efficiente. Par ailleurs, il peut être objecté que ces différences de capacité ne soient pas directement imputables à la variation de notre protocole, dans la mesure où les participants de l'Expérience 7 pourraient simplement disposer de meilleures facultés mnésiques globales. Rappelons qu'une telle différence n'a pas pu être observée pour les scores de mémorisation en ordre direct ou en ordre inverse entre les participants des deux études. Cependant, cette comparaison reste limitée, étant donné que ces indicateurs étaient manquants pour environ un tiers des participants de l'Expérience 6. Somme toute, même si l'effet propre de notre protocole sur les variations des performances mnésiques entre les deux échantillons demeure incertain, nos résultats constituent tout de même un argument supplémentaire en faveur d'un lien étroit entre capacité mnésique et spatialisation en mémoire de travail chez l'enfant d'âge scolaire.

3.5 Discussion générale intermédiaire

Ce deuxième chapitre visait à évaluer l'émergence d'une spatialisation en mémoire de travail chez l'enfant, ainsi qu'à identifier les facteurs contribuant au développement de ce phénomène. L'Expérience 5 a permis d'isoler un paradigme que nous considérions comme optimal dans la détection de l'effet, en sélectionnant les critères ayant généré un plus grand effet SPoARC chez une population adulte. Un protocole impliquant la mémorisation de séries d'images – suivie d'une phase de reconnaissance d'une sonde après la séquence – a ensuite été administré à des enfants scolarisés en CP, CE2 et CM2 dans l'Expérience 6. Dans cette étude, le nombre d'items présentés en vue d'une mémorisation a été manipulé, de sorte que les participants encodent des séries de trois ou de quatre items. La manifestation de l'effet dans les différents groupes d'âge a été comparée entre ces deux conditions expérimentales. Les résultats de cette sixième étude ont tout d'abord confirmé que l'émergence de l'effet opère au cours de l'école élémentaire, étant donné qu'une spatialisation était visible à partir du CE2 et a persisté chez les enfants de CM2. Par ailleurs, l'Expérience 6 a montré des variations dans la manifestation de l'effet en fonction du nombre d'items mémorisés chez l'enfant de CE2 (i.e., l'effet étant identifiable à l'aide de séries de trois items uniquement). Une telle modulation n'a pas été observée pour les participants de CM2, qui tendaient à spatialiser l'information quelle que soit la longueur de la séquence. Par contraste,

aucun effet SPoARC n'a pu être observé chez les élèves scolarisés en CP dans les deux conditions expérimentales.

Afin de s'assurer qu'un traitement spatial des items n'avait pas été fragilisé par l'encodage d'un trop grand nombre d'éléments chez l'enfant de CP, l'Expérience 7 a tenté de mettre en évidence une spatialisation à l'aide de séries de deux items, en comparaison avec des séries de trois. Malgré cet ajustement, cette septième étude n'a pas permis d'observer d'effet SPoARC significatif pour ce groupe d'âge, confirmant que des associations spatio-positionnelles orientées de gauche à droite ne tendent pas à être spontanément recrutées chez une majorité d'enfants scolarisés en CP. La variation de l'effet sous des séries de deux et trois items a également été étudiée auprès d'enfants scolarisés en CE2 dans cette septième expérience, avec l'hypothèse que la spatialisation atteindrait son maximum pour la longueur 3 et qu'elle ne serait pas observable pour la longueur 2. Nos résultats ont confirmé notre hypothèse concernant les séries de deux items, qui ne tendaient pas à être spatialisés par les participants. De manière plus inattendue, le SPoARC identifié en CE2 dans la tâche à trois items de l'Expérience 6 n'a pas pu être répliqué dans l'Expérience 7. Un tel résultat suggère une manifestation sporadique de la spatialisation à cet âge, l'effet étant susceptible de varier en fonction de caractéristiques individuelles ou de paramètres liés au contexte expérimental.

Nos études chez l'enfant ont également tenté de mettre en lien la spatialisation et le niveau de langage écrit des participants, sous l'hypothèse que de plus fortes compétences en lecture/écriture s'accompagneraient d'un effet SPoARC plus saillant en mémoire. L'Expérience 6 n'a pas permis de mettre en évidence une telle relation en tenant compte de l'ensemble des niveaux scolaires (i.e., du CP au CM2). Notre principale interprétation concernant cette absence de lien était que l'acquisition d'une expertise en lecture/écriture pourrait constituer un point de bascule dans l'émergence du SPoARC : une fois un seuil critique atteint, les variations de l'effet cesseraient d'être corrélées aux compétences en langage écrit. En revanche, cette dépendance au niveau de lecture/écriture serait particulièrement marquée au cours du cycle élémentaire (i.e., entre le CP et le CE2), une période caractérisée par un entraînement intensif à ces deux compétences. Un tel lien n'a pas pu être identifié dans l'Expérience 7, dans la mesure où des pentes de spatialisation plus marquées ne tendaient pas à être associées à un plus grand niveau de lecture/écriture en tenant compte de ces deux niveaux scolaires. Par ailleurs, le lien entre le SPoARC et le niveau de lecture a pu être esquissé dans la comparaison entre les échantillons de CE2 de l'Expérience 6 et de l'Expérience 7, un SPoARC plus fort étant associé à un meilleur niveau d'exactitude en lecture (en considérant les participants des deux études, et ce même après contrôle de l'âge). Dans la mesure où la variation de la tâche expérimentale entre l'Expérience 6 et l'Expérience 7 (variation liée au caractère plus ludique de l'Expérience 7) pourrait constituer un facteur confondu dans ces résultats, l'influence directe de l'exactitude en lecture ne peut pas être établie avec certitude

à ce stade. Nos résultats appellent donc à davantage d'investigations pour déterminer si des variations significatives dans le niveau de lecture opèrent dans la dernière année du cycle élémentaire et si ces variations corrèlent avec le renforcement d'une spatialisation en mémoire. De telles études pourraient confirmer que ce niveau scolaire constitue une période charnière dans l'émergence d'une spatialisation en mémoire de travail, une idée déjà proposée par Guida et al. (2020b), et qui tend à être corroborée par nos résultats.

Si les études de ce chapitre ont difficilement montré un lien entre spatialisation et langage écrit chez l'enfant d'âge scolaire, nos analyses convergent vers l'existence d'une relation entre l'effet SPoARC et la capacité mnésique verbale dans cette population. Un tel lien avait été anticipé dans nos hypothèses, sans qu'une prédiction ne soit explicitement formulée quant à la nature de cette interaction. Chez l'adulte, de meilleures performances mnésiques tendent à être associées à une plus grande spatialisation. Une étude menée par van Dijck et al. (2022) a par exemple montré que des individus présentant de meilleures aptitudes en mémoire de travail verbale (mesurées par une tâche d'empan de chiffres en ordre inverse) étaient ceux pour qui une spatialisation significative était observée à l'échelle individuelle. À l'inverse, les non-spatialiseurs de leur échantillon présentaient de plus faibles performances à la tâche de mémorisation en ordre inverse. Le présent chapitre a révélé que des patterns différents sont effectivement observables chez une population plus jeune : dans l'Expérience 6, les participants présentant de plus faibles capacités mnésiques dans la tâche de reconnaissance tendaient à présenter une plus forte spatialisation en mémoire. En tenant compte de l'ensemble des participants de l'Expérience 6 et de l'Expérience 7, un lien identique a été détecté avec l'empan endroit des participants, les élèves présentant les scores les plus faibles étant ceux qui recrutaient le plus un traitement spatial des items lors de la tâche de spatialisation. Une interprétation possible de ces résultats consiste donc à envisager le rôle fonctionnel que la spatialisation pourrait exercer lors de la mémorisation d'informations verbales. Une telle idée résonne avec les théories de Guida et Lavielle-Guida (2014) et Guida et Campitelli (2019) qui ont pu comparer le SPoARC à des méthodes mnémotechniques basées sur l'utilisation de structures de connaissances (e.g., la méthode des lieux). En enrichissant l'information encodée d'une valeur spatiale (correspondant par exemple à une localisation particulière au sein d'un palais mental pour la méthode des lieux), des individus experts peuvent sensiblement optimiser leurs capacités en mémoire (pour une revue, voir Guida et al., 2012). De la même manière, l'ajout d'une valeur spatiale aux items codés dans une tâche de mémoire à court terme pourrait favoriser le maintien des informations, permettant ainsi de compenser des difficultés rencontrées durant la tâche. Mais alors, comment expliquer que des enfants spatialisant davantage à une tâche de mémorisation ne soient pas justement ceux qui présentent les meilleures performances, témoignant du bénéfice offert par un traitement spatial des items ? Une raison possible est que le lien entre SPoARC et capacité chez

l'enfant témoigne davantage d'une *tentative* accrue de recruter une spatialisation chez des individus en situation d'échec, sans que ce processus ne soit suffisamment mature et contrôlé pour permettre une amélioration *significative* de cette performance. Avec l'avancée en âge et une mobilisation plus systématique de la spatialisation, l'individu pourrait tirer davantage profit de ce codage spatial, résultant en une relation positive entre le degré de spatialisation et la capacité en mémoire, tel qu'observé dans l'étude de van Dijck et al. (2022).

Une telle interprétation semble par ailleurs compatible avec des propositions récentes ayant tenté d'expliquer le SPoARC sous le prisme du modèle Temporel de Partage des Ressources (TBRS, pour *Time-Based Resource-Sharing model* en anglais, Barrouillet et al., 2004). Dans ce modèle, les mécanismes de maintien sériel de l'information reposeraient sur deux processus indépendants : la répétition articulatoire (aussi nommée boucle phonologique, Baddeley & Hitch, 1974 ; Baddeley, 2003) et le rafraîchissement attentionnel. Tandis que le premier mécanisme fait appel à des processus langagiers pour maintenir l'information (i.e., les items sont codés phonologiquement sous une chaîne subvocalisée répétée en continu), le deuxième mécanisme repose sur l'allocation du focus attentionnel pour rafraîchir les traces mnésiques (Camos, 2015). Il s'avère que ces deux mécanismes sont indépendants et peuvent être recrutés de manière adaptative tant chez l'adulte (Camos et al., 2009 ; Camos et al., 2011) que chez l'enfant (Mora & Camos, 2015 ; Oftinger & Camos, 2018 ; Tam et al., 2010). Par exemple, si le maintien des items en mémoire par la boucle phonologique est empêché par le biais d'une suppression articulatoire, le rafraîchissement attentionnel peut suppléer au maintien phonologique pour éviter le déclin de la trace mnésique (Camos et al., 2009 ; Mora & Camos, 2015). Comme soulevé par van Dijck et al. (2022, mais voir aussi van Dijck et al., 2020), la spatialisation en mémoire de travail pourrait trouver sa source dans ce second mécanisme, notamment parce que le SPoARC demeure visible en imposant une suppression articulatoire (Ginsburg et al., 2017) et parce qu'il semble reposer sur des mécanismes principalement attentionnels (Rasoulzadeh et al., 2021 ; van Dijck et al., 2013).

Ainsi, une lecture possible de nos résultats chez l'enfant serait de considérer le SPoARC comme résultant d'un rafraîchissement attentionnel recruté par le système cognitif lorsque le maintien des items est compromis par une faible sollicitation de la boucle phonologique. La spatialisation viendrait alors se suppléer à la stratégie articulatoire, dans le but de stabiliser la trace mnésique en liant chaque item à un marqueur spatial sur la ligne mentale horizontale. Cette explication est soutenue par le fait que le lien entre capacité et spatialisation était notable sur des tâches impliquant justement la boucle phonologique (notre tâche de reconnaissance et le subtest *Mémoire des chiffres* en ordre endroit). En raison d'un processus peu mature, l'avantage que présenteraient des individus spatialisant l'information ne serait pas encore observable sur des tâches

impliquant un traitement sériel explicite (correspondant à la tâche en ordre inverse, qui implique le maintien en mémoire de la série *via* la boucle articulatoire, mais également un traitement des données mémorisées basé sur une inversion de l'ordre sériel). La spatialisation pouvant devenir plus efficiente avec l'âge, ce sont précisément sur ce type de tâche que des individus spatialiseurs ou non-spatialiseurs se distingueraient alors à l'âge adulte (van Dijck et al., 2022 ; voir aussi Tian & Fischer-Baum, 2025).

En définitive, ce troisième chapitre a permis de compléter la littérature concernant le développement de la spatialisation en mémoire, en apportant des éléments probants quant à son émergence au cours de la scolarité. L'identification d'un effet par le biais d'un protocole similaire à celui utilisé chez l'adulte offre par ailleurs de nouvelles perspectives quant à la comparaison du SPoARC entre ces deux populations. De plus, l'estimation d'une mesure quantitative de l'effet (basée sur l'estimation d'un coefficient de régression pour chaque individu), permet d'affiner l'approche comparative visant à identifier les facteurs déterminants dans l'évolution du phénomène au fil de l'âge. Dans ce chapitre, une telle approche a par ailleurs permis de mettre en évidence le caractère fonctionnel que semble revêtir ce mécanisme. En effet, nos résultats suggèrent que la spatialisation pourrait constituer un levier recruté par l'enfant pour compenser ses difficultés mnésiques. Ce constat, couplé au fait que des spatialiseurs adultes réussissent davantage des tâches impliquant un traitement sériel de l'information (Tian & Fischer-Baum, 2025 ; van Dijck et al., 2022), soutient l'hypothèse que l'ajout d'une valeur spatiale à l'information encodée bénéficie au traitement de l'ordre en mémoire. Cependant, la question demeure quant à la pérennité de ce mécanisme lorsque l'information sérielle revêt un caractère prévisible. En effet, les tâches de spatialisation utilisées dans la littérature nécessitent le maintien d'informations présentées dans un ordre aléatoire, les séquences variant typiquement d'un essai à l'autre. Si un traitement spatial apparaît comme pertinent pour le maintien de ces informations aléatoires, la spatialisation d'une information sérielle redondante (i.e., des séquences similaires d'un essai à l'autre) pourrait s'avérer moins critique pour le système cognitif. Pour éclairer cette question, le chapitre suivant s'attachera à étudier la stabilité du phénomène lorsqu'une série d'informations verbales est consolidée en mémoire. Ces expérimentations chez l'adulte et l'enfant devraient permettre d'affiner la compréhension du SPoARC, en tentant de déterminer s'il constitue un mécanisme automatique (et inaltérable) lié au codage d'une séquence ou si son occurrence tend à décliner à mesure que l'information sérielle se consolide (appuyant l'hypothèse d'un mécanisme fonctionnel permettant un maintien facilité *temporaire* d'une information sérielle nouvelle).

Chapitre 4

Effet SPoARC et apprentissage répété

La première expérience de ce chapitre a fait l'objet d'une publication dans la revue *Memory & Cognition* (Ftaïta, Guida, Fartoukh & Mathy, 2024)[1].

4.1 Introduction **188**
4.2 Expérience 8 . . . . . **195**
4.3 Expérience 9 . . . . . **217**
4.4 Expérience 10 . . . . . **232**
4.5 Discussion générale intermédiaire **243**

[1] Les résultats de cette expérience ont également été présentés à l'occasion des conférences suivantes : *23rd Conference of the European Society for Cognitive Psychology* (2023), *Workshop 'Relations between space, language, and numbers'* (2024). Les résultats de l'Expérience 9 ont quant à eux été présentés à la conférence suivante : *65th Annual meeting of the Psychonomic Society* (2024).

4.1 Introduction

Une caractéristique commune à la majorité des études sur le SPoARC concerne le fait que les séquences présentées en vue de leur mémorisation varient généralement entre les essais. Dans ce contexte, il a été conclu que des associations spatio-positionnelles se produisent lorsque les individus maintiennent temporairement des informations sérielles *nouvelles*. Cependant, une question demeure concernant la durabilité du phénomène lorsque l'ordre sériel est consolidé par le système cognitif pendant l'encodage. En d'autres termes, il reste à déterminer si la spatialisation demeure uniquement impliquée lorsque les individus traitent temporairement des séquences nouvelles en mémoire, ou si le phénomène persiste pour des séquences *familières*. En supposant qu'un encodage itératif d'une même information puisse conduire à un apprentissage (comme dans l'effet de répétition de Hebb : Hebb, 1961 ; Page & Norris, 2009), les études de ce chapitre viseront à déterminer si le SPoARC persiste lorsqu'une séquence est apprise au cours d'une tâche de spatialisation.

Le SPoARC : un phénomène général ou fonctionnel L'étude de la persistance à long terme de l'effet SPoARC soulève diverses questions. La première porte sur la nature de la spatialisation et sur son rôle intrinsèque en mémoire de travail. À cet égard, deux hypothèses opposées peuvent être formulées quant au rôle de la spatialisation dans le traitement d'informations sérielles familières. Une première possibilité est de considérer la spatialisation comme un mécanisme général et automatique, recruté pour coder l'ordre sériel indépendamment du degré de familiarité associé à l'information traitée. Selon cette hypothèse, toute information sérielle maintenue en mémoire de travail bénéficierait systématiquement d'un traitement spatial. Les séquences familières seraient spatialisées de la même manière que des séquences nouvelles, chaque élément de la série familière conservant une coordonnée spatiale distincte sur la ligne mentale (c'est-à-dire, la coordonnée initialement attribuée au moment où la séquence est pour la première fois encodée). En ce sens, un SPoARC pourrait être observé à la fois pour des informations nouvelles et pour des informations consolidées, car le traitement spatial des items constituerait un processus automatique recruté par le système cognitif pour coder l'ordre des informations. Cependant, le fait que tous les individus ne soient pas systématiquement identifiés comme spatialiseurs (Guida et al., 2020c ; van Dijck et al., 2020, voir aussi les expériences du Chapitre 3) ne plaide pas en faveur d'un mécanisme général qui sous-tendrait automatiquement le traitement de l'ordre en mémoire de travail.

Une seconde hypothèse est que la spatialisation pourrait constituer un mécanisme

fonctionnel, mobilisé essentiellement pour faciliter la mémorisation lorsque le traitement de l'ordre sériel nécessite un appui supplémentaire (sans que ce processus ne soit pour autant délibéré). Une telle proposition fait écho aux résultats des Expériences 6 et 7 du précédent chapitre, qui suggèrent qu'un traitement spatial des items pourrait être préférentiellement recruté – du moins chez l'enfant – pour compenser des difficultés mnésiques durant la tâche. Un autre argument en défaveur d'un mécanisme général concerne la flexibilité de la spatialisation, qui peut varier en fonction des exigences de la tâche. Par exemple, Guida et al. (2020c) ont montré que des participants pouvaient inverser la direction de leurs pensées lorsqu'ils y étaient incités au cours d'une tâche mesurant l'effet SPoARC. En considérant la spatialisation comme un mécanisme adaptatif, permettant de soutenir le traitement de l'information sérielle en l'enrichissant d'une valeur spatiale, il peut alors être envisagé que ce phénomène évolue progressivement à mesure que la familiarité avec une séquence se renforce au fil du temps. En d'autres termes, nous suggérons que des marqueurs spatiaux pourraient être mobilisés pour accroître la probabilité de se remémorer une séquence uniquement lorsqu'elle est nouvelle. En revanche, il apparaît peu probable que l'usage de coordonnées spatiales distinctes demeure nécessaire une fois l'information sérielle consolidée, car l'ordre des différents éléments serait alors suffisamment ancré en mémoire à long terme pour être traité sans difficulté, sans le besoin d'information redondante.

Spatialisation et chunking en mémoire À notre connaissance, seules deux études permettent actuellement d'éclairer la manière dont le traitement répétitif d'une séquence pourrait influencer la spatialisation en mémoire de travail. Previtali et al. (2010) ont par exemple observé un SPoARC lorsque des participants devaient traiter une séquence de neuf mots qu'ils avaient préalablement apprise *via* de multiples essais. Un tel résultat pourrait indiquer que l'utilisation répétée d'une seule séquence n'affecte pas la spatialisation, appuyant ainsi l'hypothèse du mécanisme général proposée précédemment. Cependant, la présence de l'effet pour des listes répétées dépassant la capacité moyenne en mémoire de travail n'implique pas nécessairement le même résultat pour des listes répétées d'une plus courte longueur, en particulier parce que des listes plus courtes pourraient favoriser la création de chunks en mémoire. Par ailleurs, les résultats de l'Expérience 5 du précédent chapitre peuvent également s'avérer informatifs quant à la consolidation du SPoARC au fil de la répétition. Pour rappel, cette expérience impliquait la mémorisation d'une série de quatre éléments, suivie d'une phase de reconnaissance lors de laquelle une sonde devait être identifiée comme faisant partie ou non de la série mémorisée. Cette phase de reconnaissance a été manipulée, de sorte que la moitié des participants devaient traiter une seule sonde avant de passer à l'essai suivant (condition Mono-cible), tandis que l'autre moitié des participants étaient testés sur une série de huit sondes successives (condition Multi-cible). Par le biais de ces

tests, la condition Multi-cibles incitait les participants à effectuer un balayage mental répété de la série mémorisée à chaque fois qu'un item devait être traité en vue d'une reconnaissance, et il s'avère que nos résultats allaient dans le sens d'un SPoARC d'une plus faible intensité dans cette condition expérimentale. Une première interprétation proposée pour rendre compte de ces résultats était que la spatialisation avait pu être altérée du fait de l'interférence induite par la multiplication des items tests lors de la phase de reconnaissance, ceux-ci pouvant provoquer une interférence rétroactive avec les éléments de la séquence mémorisée : répondre successivement à différents items aurait pu progressivement fragiliser la représentation spatiale de la séquence, rendant le SPoARC moins saillant dans nos résultats.

Cependant, une autre interprétation a été avancée pour expliquer la diminution du SPoARC dans la condition Multi-cible. Les scans répétitifs induits dans cette condition expérimentale auraient pu contribuer à renforcer les connexions entre les items de la séquence maintenue en mémoire, résultant ainsi en un regroupement des éléments mémorisés en une unité singulière (i.e., un chunk). Décrit pour la première fois par Miller (1956), un chunk peut être défini, selon Cowan (2001, p. 89), comme « un ensemble de concepts qui ont de fortes associations les uns avec les autres et des associations beaucoup plus faibles avec d'autres chunks utilisés simultanément ». Cowan (2001) illustre cette définition en montrant que la familiarité avec les acronymes d'agences américaines permet de segmenter une chaîne *a priori* sans signification (« fbicbsibmirs ») en quatre blocs interprétables (« FBI », « CBS » , « IBM » et « IRS »). En revenant aux résultats de l'Expérience 5, la formation d'un chunk dans la condition Multi-cibles aurait pu entraîner l'atténuation du SPoARC, car l'encodage spatial de chaque élément individuel au sein de ce chunk putatif aurait pu être d'une moindre utilité pour le système cognitif, une interprétation faisant écho à l'hypothèse fonctionnelle présentée plus haut.

L'idée que le système cognitif puisse recourir à une seule entité pour représenter une structure plus complexe d'éléments individualisés semble largement admise dans la littérature. Dans le domaine de la mémoire de travail visuelle, la notion de pointeur[2] a par exemple été utilisée par Thyer et al. (2022) pour exprimer l'idée que la mémoire de travail pourrait recourir à une entité unique afin de maintenir une série d'informations, plutôt que d'en stocker directement ses caractéristiques spécifiques. Une idée comparable est retrouvée dans le modèle de primauté de Page et Norris (2009) : selon les auteurs, une séquence apprise par le système cognitif est représentée par un seul « nœud chunké » (ou *chunk node* en anglais, Page & Norris, 2009, p. 3748 ; Hurlstone et al., 2014, p. 15). Ce nœud fait référence à l'intégralité de la série, tandis que l'ordre

[2] En programmation, un pointeur constitue une variable dont la valeur correspond à l'adresse mémoire d'une autre variable ou d'une structure de données. Plutôt que manipuler directement la donnée elle-même, le pointeur permet un adressage indirect en pointant vers l'emplacement où la donnée est stockée en mémoire (voir par exemple Canteaut, 2003, pp. 43-44 ; ou Toumanari, 2025).

des éléments au sein du nœud est codé à l'aide d'un gradient d'activation. Dans la littérature relative aux processus de chunking, les éléments d'un chunk sont généralement considérés comme étant regroupés sous une référence unique. Huang et Awh (2018) parlent par exemple du chunk comme étant une « étiquette libre de contenu » incorporant un ensemble plus large d'éléments. Ainsi, le terme « arc-en-ciel » peut renvoyer à l'ensemble de la série [rouge-orange-jaune-vert-bleu-indigo-violet]. Une conception analogue apparaît dans la littérature sur la mémoire experte : un seul chunk permet de récupérer toute une collection d'éléments. Par exemple, Gobet et Simon (1996) ont proposé que les experts s'appuient sur des templates (également appelés schémas) pour organiser hiérarchiquement des items et des chunks. De tels modèles comprennent des emplacements vides (slots), permettant le stockage d'un ensemble d'éléments regroupés en une unité signifiante. Au sein d'un template, le format d'une date (par exemple la séquence [2-0-2-5]) n'occupe qu'un seul emplacement lorsque les quatre items sont chunkés en une seule unité (i.e., 2025). Comme présenté dans l'introduction de cette thèse, la ligne mentale horizontale sous-tendant le SPoARC peut être assimilée sur un plan théorique à une structure comportant des slots (dans une dimension moins complexe que les structures recrutées chez l'expert, voir Guida & Lavielle-Guida, 2014 ; Guida & Campitelli, 2019). En adoptant l'idée générale selon laquelle les chunks peuvent être maintenus en mémoire comme des entités uniques plutôt que comme la somme du contenu auquel ces chunks renvoient, nous postulons qu'une série d'informations consolidée au cours d'un apprentissage répété pourrait être associée à une seule coordonnée sur la ligne mentale, ce qui se traduirait alors par l'absence d'un SPoARC lorsque la mémoire est testée sur des informations sérielles familières.

Optimisation de la détection du SPoARC chez l'enfant Si nous supposons que la consolidation de l'information sérielle résulte en une disparition de la spatialisation du fait de la création d'un chunk en mémoire, il demeure possible que l'apprentissage répété d'une même séquence génère également un renforcement cumulatif des associations entre item et position. À l'inverse de la prédiction précédente (découlant de l'hypothèse de la formation de chunks), ce renforcement cumulatif pourrait résulter en un SPoARC plus saillant, dans la mesure où les liens entre les items et leurs coordonnées spatiales deviendraient de plus en plus robustes au fil de l'apprentissage. Le fait que l'apprentissage sériel puisse être caractérisé par un renforcement des associations item-position reste soutenu par la littérature. Par exemple, une étude menée par Majerus et Oberauer (2020) a montré – de manière tout à fait fortuite – que plus un item avait été présenté dans une position similaire à travers les listes mémorisées par les participants, mieux le rappel de cet item en particulier était favorisé (à la différence d'items dont la position était différente entre les essais). L'examen des erreurs de rappel a également montré que, lorsque des items d'une autre liste étaient rappelés de façon

intrusive, ces items avaient tendance à être placés à la même position que dans leur liste d'origine, à condition que cette position ait été répétée au fil des essais. Une telle étude suggère qu'un mécanisme d'apprentissage associatif entre items et positions peut être impliqué dans l'acquisition à long terme de séquences, bien que – de façon non contradictoire avec l'hypothèse de la formation de chunks – cet apprentissage puisse aboutir *in fine* à la création d'unités singulières en mémoire (Araya et al., 2022, 2024 ; Hitch et al., 2005 ; Mızrak & Oberauer, 2022 ; Musfeld et al., 2024 ; Page & Norris, 2009 ; Szmalec et al., 2009).

Dans le cadre de la spatialisation, il peut donc être envisagé qu'un SPoARC demeure visible pour les premières occurrences d'une séquence répétée, témoignant du renforcement entre items et positions à l'œuvre pendant la consolidation. Sur la base de ce postulat, nous proposons que l'utilisation d'un paradigme répété puisse alors constituer une piste méthodologique pour optimiser la détection d'un SPoARC chez l'enfant. La raison est que, pour des tâches impliquant la mémorisation de séries aléatoires, la mise à jour des associations entre items et positions pour chaque séquence pourrait se révéler trop complexe pour qu'une spatialisation suffisamment saillante soit visible durant la tâche. En reprenant l'analogie de la ligne mentale organisée en slots, un protocole reposant sur des séquences différentes d'un essai à l'autre pourrait conduire le participant à y insérer temporairement les items A-B-C-D lors du premier essai, avant de les effacer rapidement pour y placer B-A-D-C à l'essai suivant, ce processus se répétant sur un ensemble conséquent d'essais. Une telle dynamique suppose une mise à jour flexible et constante de la représentation spatiale de chaque séquence, dont l'implémentation pourrait être ralentie ou se révéler moins efficiente chez une population plus jeune. Il résulterait alors d'un tel processus des effets peu robustes, fluctuants voire inexistants, tels qu'observés dans le chapitre précédent. À l'inverse, la répétition d'une même séquence au fil des essais pourrait favoriser l'élaboration d'une représentation mentale plus stable, dans la mesure où les mêmes items seraient systématiquement codés à une position congruente d'un essai à l'autre. En ce sens, une deuxième implication de l'étude de la consolidation du SPoARC utilisant un protocole répété réside dans le bénéfice qu'un tel protocole pourrait apporter pour une détection plus robuste de la spatialisation chez l'enfant. Bien qu'un tel protocole puisse résulter en la disparition du SPoARC à long terme pour les raisons évoquées plus haut, des effets significatifs pourraient néanmoins apparaître au cours des premières présentations de la séquence, offrant alors la possibilité de faire usage de séquences répétées pour examiner plus finement le développement de la spatialisation à l'avenir.

Rôle de la spatialisation dans l'apprentissage En dernier point, nous proposons que l'étude du SPoARC par le biais d'un paradigme répété puisse indirectement fournir

des indices sur le rôle que peut jouer la spatialisation en mémoire de travail sur l'intégration de nouvelles connaissances en mémoire à long terme. L'idée que le traitement spatial d'une information ordinale puisse participer à une meilleure consolidation de l'information trouve une première justification dans les théories de la mémoire experte. Dans la méthode des lieux, la spatialisation intentionnelle des items au moment de l'encodage permet d'accroître considérablement les capacités de maintien et de rappel. Que ce soit chez des individus experts, ou chez des participants naïfs entraînés à la méthode des lieux, l'efficacité de cette technique est non seulement observable à très court terme (i.e., quelques minutes après l'encodage, McCabe, 2015 ; Wagner et al., 2021), mais tend également à perdurer dans le temps : des performances significativement plus élevées sont visibles au-delà de 24 heures (Wagner et al., 2021), une semaine ou même quelques mois après l'encodage (Werner-Seidler & Dalgleish, 2016). De tels résultats appuient l'idée que l'enrichissement spatial d'une information mémorisée peut favoriser la consolidation de traces mnésiques plus durables en mémoire à long terme.

Dans le cadre du SPoARC, il est déjà établi que des individus adultes spatialisant l'information tendent vers de meilleures performances de rappel à court terme, notamment sur des tâches nécessitant la mémorisation et la manipulation de l'ordre sériel (Tian & Fischer-Baum, 2025 ; van Dijck et al., 2022). Par ailleurs, de meilleures capacités liées spécifiquement au traitement de l'*ordre* en mémoire de travail sont également associées à de plus grandes capacités d'apprentissage. Des études menées chez l'adulte ont par exemple montré qu'une meilleure performance à des tâches mesurant le rappel de l'ordre sériel corrèle avec une meilleure acquisition de mots nouveaux (Gupta, 2003 ; Majerus et al., 2006a, 2008). Un tel lien est également visible chez l'enfant, dans la mesure où de meilleures capacités dans le traitement de l'ordre en mémoire de travail mesurées à quatre ans prédisent une plus grande acquisition du vocabulaire un an plus tard (Leclercq & Majerus, 2010 ; voir aussi Majerus et al., 2006b, 2009 ; Majerus & Boukebza, 2013). De tels résultats étayent l'hypothèse que la mémoire à court terme sérielle est cruciale non seulement pour le maintien mais aussi pour l'apprentissage de séquences verbales nouvelles (Gupta, 2003).

En tenant ainsi compte du rôle critique que joue le traitement à court terme de l'ordre sériel sur la consolidation en mémoire, et en considérant la spatialisation comme un mécanisme fonctionnel permettant justement d'enrichir l'information ordinale d'une valeur spatiale pendant la mémorisation, il apparaît alors plausible qu'un apprentissage plus efficient soit observé chez des individus faisant usage de marqueurs spatiaux pour soutenir le maintien et le traitement temporaire de l'ordre sériel. En ce sens, l'usage d'un paradigme répété offre le troisième avantage d'étudier si un tel lien s'observe lorsque des participants encodent une information sérielle par le biais de multiples itérations. Comme proposé dans la section précédente, une spatialisation pourrait intervenir au premier stade de l'apprentissage répété, en raison du renforcement des associations

entre les items et leur position sérielle dans la séquence. Si cette spatialisation s'avérait effectivement visible dans nos données, l'association du SPoARC aux capacités d'apprentissage des participants pourrait alors faire l'objet d'une analyse spécifique. Sans constituer l'objectif principal de ce chapitre, les études développées ci-dessous exploiteront néanmoins les données disponibles pour examiner, à titre exploratoire, si un tel lien se manifeste tant chez l'adulte que chez l'enfant. Une telle analyse pourrait ainsi fournir des premiers éléments empiriques en faveur du bénéfice d'un traitement spatial de l'ordre en mémoire de travail sur la consolidation mnésique.

Pour résumer, les études de ce chapitre tenteront d'examiner la consolidation du SPoARC au fil d'un paradigme répété, au cours duquel une seule information sérielle sera encodée de multiples fois par les participants. De telles études s'articuleront autour de trois implications principales. Premièrement, il s'agira de déterminer si la spatialisation constitue un mécanisme transitoire dont l'occurrence tend à décliner à mesure qu'une séquence devient familière pour le système cognitif. De tels résultats tendraient à invalider l'hypothèse d'un mécanisme général, pour favoriser une conception fonctionnelle de la spatialisation : un traitement spatial des items s'avérerait utile uniquement lorsque l'information sérielle est nouvelle. Un deuxième objectif sera d'examiner si un SPoARC reste détectable au premier stade de l'apprentissage répété, ce qui suggérerait que la répétition d'une information sérielle participe à un renforcement temporaire des liens entre les items et leur position, avant que la séquence ne soit codée comme une entité singulière en mémoire. Un tel résultat offrirait alors des pistes méthodologiques pour optimiser la détection d'un SPoARC chez l'enfant, dans la mesure où un paradigme répété pourrait temporairement générer des associations spatio-positionnelles plus stables en mémoire de travail, et, ce faisant, accroître la saillance de l'effet. Le troisième objectif de ce chapitre consistera à explorer si un lien entre spatialisation et consolidation mnésique est visible, avec l'hypothèse principale qu'un traitement spatial plus performant soit corrélé avec de meilleures capacités d'apprentissage. Un tel résultat pourrait ouvrir la voie à de futures études visant à préciser le rôle de la spatialisation dans l'optimisation de l'apprentissage sériel. L'Expérience 8 constituera une première étude de référence pour répondre à ces questions, en examinant la consolidation du SPoARC chez une population adulte. Par la suite, les Expériences 9 et 10 s'attacheront à répliquer ces investigations chez une population plus jeune. Des élèves scolarisés en CM2 ont été retenus pour ces deux études, afin de maximiser les chances d'obtenir des effets robustes, avant d'envisager leur investigation chez des enfants d'âge plus précoce.

4.2 Expérience 8

4.2.1 Objectif

Cette huitième expérience visait à étudier la stabilité de l'effet SPoARC chez l'adulte en recourant à un protocole où la consolidation d'une séquence serait favorisée par des essais répétés. En supposant qu'une séquence consolidée en mémoire à long terme puisse être codée sous la forme d'un chunk (Smalle et al., 2016), nous émettons l'hypothèse que les items de la série pourraient être unifiés spatialement en mémoire de travail. Par conséquent, nous proposons que l'intensité du SPoARC devrait décliner au fil de l'apprentissage répété, dans la mesure où le regroupement de la séquence en une seule unité affecterait les marqueurs positionnels initialement associés à chaque item. Un tel déclin est envisagé dans nos résultats principalement parce que le SPoARC est pensé comme reflétant le codage sériel d'informations nouvelles en mémoire de travail (Abrahamse et al., 2014 ; Guida & Lavielle-Guida, 2014). Nous supposons donc que l'ordre sériel des items ne devrait plus être codé *spatialement* une fois qu'un chunk est formé en mémoire. Pour mieux étudier la variation de la spatialisation au cours du processus de répétition, la présence d'un SPoARC a été examinée dans la première et dans la seconde moitié de la tâche. Là où les premières répétitions pourraient conduire à un renforcement des associations spatio-positionnelles initialement visibles en mémoire de travail (impliquant qu'un SPoARC soit détectable en début de tâche), nous anticipons que cet effet disparaîtra une fois la séquence consolidée. Ainsi, aucun effet SPoARC ne devrait être visible dans la seconde moitié du processus de répétition. Dans le cas où une spatialisation serait par ailleurs détectée au début de la tâche, une analyse exploratoire sera réalisée afin de mettre en lien le SPoARC et les indicateurs disponibles des capacités d'apprentissage des participants (appréciées à la fois au cours de la tâche répétée et lors d'une tâche de rappel différé réalisée un mois plus tard pour contrôler la rétention de la séquence mémorisée). Enfin, les données d'une étude antérieure menée au sein de notre laboratoire seront réanalysées dans cette huitième étude, dans le but de comparer la spatialisation associée aux séquences répétées de notre protocole à celle plus généralement observée pour des séquences aléatoires (i.e., des séquences dont l'ordre des items varie d'un essai à l'autre).

4.2.2 Méthode

4.2.2.1 Participants

Un total de 41 étudiants en première et deuxième année de Psychologie ont pris part à cette expérience et ont reçu un point bonus sur leur note de statistiques en

échange de leur participation. Quatre participants ont été exclus en raison d'un trouble dyslexique ($N = 3$) ou dyspraxique ($N = 1$) rapporté par auto-questionnaire. Les 37 participants restants présentaient tous une acuité visuelle normale ou corrigée, et aucun ne présentait de trouble moteur, cognitif ou psychique connu. L'échantillon comprenait 35 femmes et deux hommes (âge moyen = 21 ans, $ET = 5.6$), avec un total de 34 participants droitiers. Parmi les 37 étudiants, 30 étaient de langue maternelle française. Les sept participants restants étaient respectivement de langue maternelle albanaise, arabe, chinoise ($N = 2$), italienne ($N = 2$) et géorgienne.

4.2.2.2 Matériel

Le programme PsychoPy implémenté dans la condition Mono-image de l'Expérience 5 a été utilisé pour cette étude. Les stimuli étaient également similaires (i.e., dix images de fruits : banane, cerise, citron, framboise, grenade, kiwi, myrtille, orange, pastèque et raisin). Un ensemble de dix stimuli supplémentaires a été conçu uniquement pour l'entraînement que les participants devaient effectuer avant la tâche de spatialisation. Ces stimuli complémentaires ont permis aux participants de se familiariser avec la tâche, sans qu'aucun élément devant être mémorisé par la suite ne leur soit présenté durant cet entraînement. À cette fin, dix dessins colorés d'animaux (abeille, cheval, cochon, fourmi, girafe, grenouille, mouton, oiseau, poisson et tortue) ont été sélectionnés dans la base de données IMABASE (Bonin et al., 2020). Pour chaque participant, le *memorandum* consistait en deux séquences de quatre items tirés aléatoirement à partir du set initial. Ce tirage était effectué sans remise, de sorte qu'aucun item ne soit répété entre les deux séries mémorisées. Chaque séquence était assignée à une session expérimentale – composée de 32 essais – lors de laquelle le participant devait répondre selon une assignation réponse/main donnée (e.g., « oui » de la main droite et « non » de la main gauche pour la première session et inversement pour la deuxième, contrebalancé entre les participants).

En vue de procéder à une estimation du SPoARC selon l'apprentissage, chaque session a été divisée en deux blocs homogènes de 16 essais chacun. Sur ces 16 essais, 50% des sondes présentées au participant étaient des items cibles (i.e., des items appartenant à la séquence mémorisée) tandis que les 50% restants étaient des items leurres. Ces 16 essais étaient présentés dans un ordre aléatoire aux participants. Concernant les items cibles, les éléments placés en première, deuxième, troisième et quatrième position dans la séquence mémorisée ont été testés un nombre équivalent de fois au sein d'un bloc, pour un total de deux tests par position, soit quatre tests sur l'ensemble de la session expérimentale. La répartition des items leurres a été élaborée comme suit : pour une séquence donnée, les leurres correspondaient aux quatre items de la séquence opposée (i.e., la séquence mémorisée dans la seconde session expérimentale), ainsi qu'à deux

items n'appartenant à aucune des deux séquences à mémoriser. En considérant par exemple la séquence [1-2-3-4] pour la première session, les items 5, 6, 7, 8, 9 et 10 correspondaient aux leurres lors de la phase de reconnaissance. À l'inverse, les items 1, 2, 3, 4, 9 et 10 ont été utilisés comme leurres lorsque la séquence [5-6-7-8] était présentée dans la deuxième session. Toujours concernant les leurres, la présentation de chaque item issu d'une séquence opposée a été limitée à une seule occurrence au sein d'un bloc, tandis que les items 9 et 10 étaient testés deux fois chacun par bloc.

4.2.2.3 Procédure

Tâche de spatialisation L'expérience durait environ une heure et se déroulait dans une salle calme. Les participants étaient placés à environ 50 cm de l'écran, et l'expérimentateur monitorait la progression de la tâche sur un écran annexe. L'expérience débutait par quatre essais d'entraînement afin que les participants se familiarisent avec les consignes. Ces derniers étaient informés qu'ils devaient mémoriser une séquence de quatre animaux, qui serait répétée sur l'ensemble des essais. Après chaque présentation de la séquence, les participants devaient indiquer si un autre item faisait partie de la séquence mémorisée ou non en répondant sur les touches « S » et « L » du clavier (identifiables grâce à des autocollants de couleur rouge ou verte). Il leur était rappelé de toujours garder leurs doigts sur ces deux touches, afin de répondre le plus rapidement possible.

Une fois l'entraînement terminé, l'expérimentateur informait les participants que les items devant être mémorisés ne seraient désormais plus des animaux, mais des fruits. Avant de débuter la phase expérimentale, celui-ci s'assurait que chaque participant était en mesure de nommer ces stimuli, en apportant une correction en cas d'erreur. Par la suite, les participants réalisaient une série de 32 essais, lors desquels une unique séquence était présentée en vue d'une mémorisation. Chaque phase de mémorisation était suivie d'une phase de reconnaissance, les participants disposant de 3500 ms pour indiquer leur réponse. Une fois la réponse collectée (ou une fois le temps imparti écoulé), l'expérimentateur s'assurait que les participants étaient suffisamment attentifs avant de cliquer sur une souris annexe pour démarrer l'essai suivant. À l'issue de la première session, une pause de cinq minutes était proposée aux participants. Ces derniers effectuaient ensuite une seconde session expérimentale, également précédée d'un échauffement. Lors de cette seconde session, une séquence différente était répétée durant 32 essais, pour lesquels les participants devaient répondre en suivant l'assignation réponse/main opposée à celle utilisée lors de la première session.

Mesure de rétention à long terme Un mois après la tâche de spatialisation, les participants ont été contactés par téléphone et ont été invités à répondre à quelques

questions concernant l'expérience. L'objectif de cet entretien était d'évaluer si les participants pouvaient se souvenir des deux séquences mémorisées. Une première phase de rappel libre s'est déroulée comme suit : pour chaque séquence, les participants devaient spontanément rappeler le plus d'éléments possible, en essayant de placer les items dans le bon ordre. Les participants étaient également invités à fournir un pourcentage de certitude quant à l'exactitude de leurs réponses. Pour chaque séquence, l'expérimentateur relevait le nombre d'items rappelés à la bonne position (score lié à l'ordre), ainsi que le nombre d'items correctement rappelés indépendamment de leur position (score lié à l'item).

Indépendamment de la précision de ces réponses spontanées, les participants ont ensuite réalisé une tâche de rappel indicé. Pour chaque participant, un ensemble de quatre séquences a été conçu. Cet ensemble comprenait les deux séries mémorisées durant la tâche de spatialisation, ainsi que deux séquences leurres qui ne correspondaient pas au *memorandum*. Ces séquences leurres étaient composées d'éléments qui n'avaient jamais été mémorisés par le participant, ainsi que d'items issus des deux séquences cibles. En considérant par exemple les items 1, 2, 3, 4 comme faisant partie de la première séquence mémorisée, et les items 5, 6, 7, 8 comme faisant partie de la deuxième séquence mémorisée, les items 9 et 10 ont été respectivement placés dans l'une des deux séquences leurres. La position de ces deux éléments a été contrebalancée entre les participants de sorte qu'ils soient placés soit en première, deuxième, troisième ou quatrième position dans la série. Les items des deux séquences mémorisées ont ensuite été distribués aléatoirement entre les deux séquences. Une séquence leurre pouvait ainsi être composée d'items issus de la première et de la deuxième série mémorisée, en suivant un ordre différent de celui encodé durant la tâche. L'ordre dans lequel les quatre séquences étaient présentées était contrebalancé entre les participants selon les permutations présentées dans le Tableau D.1 en Annexe D.

Lors de la tâche de rappel indicé, les participants étaient informés qu'ils allaient entendre quatre séquences différentes, comprenant les deux séries mémorisées au cours de l'expérience. Les participants devaient indiquer s'ils reconnaissaient ou non les séquences énoncées par l'expérimentateur, tout en estimant un pourcentage de certitude concernant leur réponse. Lorsque les participants pensaient reconnaître une séquence cible, il leur était également demandé de préciser s'il s'agissait selon eux de la première ou de la deuxième série qu'ils avaient mémorisée. Cette procédure était répétée pour les trois séquences suivantes. Une fois toutes les séquences énoncées, les participants avaient la possibilité d'écouter de nouveau les quatre séries et de modifier leurs réponses s'ils le souhaitaient. La première et la dernière réponse donnée lors du rappel indicé étaient toutes deux enregistrées par l'expérimentateur. Parmi les 37 participants ayant pris part à cette huitième étude, 34 ont pu être recontactés en vue du rappel à long terme.

4.2.3 Résultats

4.2.4 Analyse préliminaire

Taux de réussite La proportion de réponses correctes sur l'ensemble de la tâche était égale à .95 (ET = .04, min = .80, max = 1). Les résultats ont montré que les deux séquences codées par les participants ont conduit à des taux de réussite similaires, les participants ayant présenté des performances égales entre la première et la deuxième session expérimentale (m_{S1} = .953, ET = .04, m_{S2} = .949, ET = .05, $t(36) = 0.65, p =$ .523, d de Cohen = 0.11). Une comparaison des performances entre les deux blocs a ensuite été réalisée dans le but de mettre en évidence une progression globale entre les 16 premières et les 16 dernières répétitions. Les résultats ont montré des performances similaires entre les deux blocs (m_{B1} = .948, ET = .05, m_{B2} = .954, ET = .05, $t(36) = -0.76, p$ = .540, d de Cohen = -0.13).

Rétention à long terme Les résultats de la tâche de rappel effectuée un mois après la tâche de spatialisation ont révélé que les participants avaient des difficultés à se souvenir des deux séquences qu'ils avaient mémorisées lors du rappel libre. Le Tableau 4.1 rend compte des proportions de participants ayant rappelé soit zéro, un, deux, trois ou quatre items pour chaque série, en distinguant les scores liés à l'item des scores liés à l'ordre. Les performances étaient cependant meilleures en utilisant le rappel indicé, car 79% des participants ont pu reconnaître les deux séries qu'ils avaient encodées pendant la tâche. Seuls 3% des participants n'ont reconnu aucune des séquences, tandis que les 18% restants ont réussi à identifier l'une des deux séquences présentées.

TABLEAU 4.1 – Rappel libre : effectif et proportions de participants ayant rappelé entre zéro et quatre éléments pour chacune des deux séquences mémorisées dans l'Expérience 8, indépendamment de la position (Item) et en fonction de la position (Ordre)

	Item		Ordre	
	Séquence 1	Séquence 2	Séquence 1	Séquence 2
0 item	5 (15%)	13 (38%)	16 (47%)	24 (71%)
1 item	9 (26.5%)	9 (26.5%)	13 (38%)	7 (20%)
2 items	10 (29%)	9 (26.5%)	4 (12%)	1 (3%)
3 items	9 (26.5%)	2 (6%)	1 (3%)	1 (3%)
4 items	1 (3%)	1 (3%)	0 (0%)	1 (3%)

Note. Séquences 1 *vs.* 2 font respectivement référence aux séquences présentées lors de la première *vs.* la deuxième session expérimentale, qui impliquaient des assignations réponses-main différentes.

Régression des temps de réponse en fonction du numéro d'essai Une analyse de régression a été conduite afin de modéliser l'apprentissage de l'information sérielle au fil des essais. Les temps de réponse obtenus pour l'ensemble des items (i.e., leurres et cibles) ont été winsorisés pour chaque participant, aboutissant à la transformation de 4% des données. Des modèles de régression ont été ajustés sur ces temps de réponse, en prenant le numéro d'essai comme variable prédictive et le numéro de participant comme variable aléatoire. Le premier modèle tenait compte des temps de réponse obtenus pour les Essais 1 à 32 (renvoyant à la première séquence mémorisée et à une assignation réponse/main donnée, par exemple oui/main gauche et non/main droite), tandis que le deuxième tenait compte des Essais 33 à 64 (soit la deuxième séquence, associée à l'assignation réponse/main inverse, i.e., oui/main droite et non/main gauche). Les coefficients de régression obtenus pour les deux pentes ont ensuite été opposés à zéro par le biais d'un test t de Student.

Pour les deux séquences, les résultats ont montré que les temps de réponse diminuaient respectivement de 3 ms et de 2 ms pour chaque unité du facteur Numéro d'essai, indiquant des réponses de plus en plus rapides au fil des répétitions ($t(1177) = -6.11$, $p < .001$, $Std.\beta = -0.12$ pour la première séquence et $t(1177) = -4.08$, $p < .001$, $Std.\beta = -0.07$ pour la deuxième séquence). La Figure 4.1 montre les courbes de régression obtenues pour les Essais 1 à 32 (première séquence) et les Essais 33 à 64 (deuxième séquence). Sur cette figure, une augmentation notable des temps de réponse est également visible entre le dernier essai de la première séquence et le premier essai de la seconde séquence. Bien que cette augmentation puisse refléter un coût cognitif causé par l'inversion des assignations réponse/main entre les deux sessions, il est possible que la transition d'une séquence sur-apprise vers une séquence nouvelle ait également contribué à ce résultat. De plus, il semble que l'apprentissage sériel se soit traduit par une diminution continue des temps de réponse, ne permettant pas de localiser précisément le moment où la consolidation de la séquence aurait pu survenir.

En dépit de l'apparente diminution continue des temps de réponse, la courbe d'apprentissage a ensuite été testée pour chaque bloc en commençant par la première partie de la tâche (Bloc 1), puis la seconde moitié de la tâche (Bloc 2)[3]. Les résultats ont montré une diminution significative des temps de réponse en fonction du numéro d'essai dans le premier bloc ($\beta = -5, t(1177) = -4.81, p < .001, Std.\beta = -0.09$) mais pas dans la seconde partie de la tâche ($\beta = -0.62$, $t(1177) = -0.59$, $p = .556$, $Std.\beta = -0.01$). Pris ensemble, ces résultats appuient l'hypothèse selon laquelle la répétition a conduit à l'apprentissage des séquences mémorisées, caractérisé par une accélération notable des temps de réponse dans le premier bloc, suivie d'une stabilisation dans le deuxième

[3] Nous utilisons ici cette numérotation de bloc pour faire référence aux 16 premières répétitions de la séquence, quelle que soit la session/la main de réponse, versus les 16 dernières.

bloc[4].

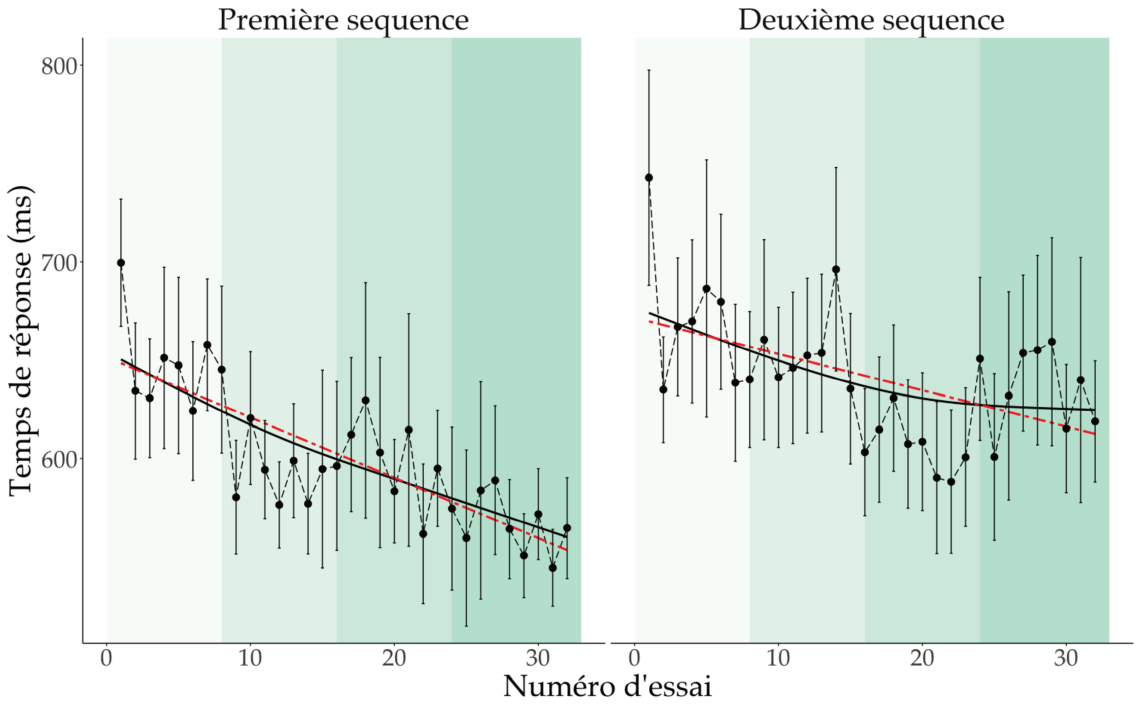


FIGURE 4.1 – Moyenne et régression linéaire des temps réponse (exprimés en millisecondes) en fonction du numéro d'essai pour chaque séquence répétée de l'Expérience 8. *Note.* Chaque séquence était associée à une seule assignation réponse/main (i.e., oui/-main gauche et non/main droite pour la première séquence, contre oui/main droite et non/main gauche pour la deuxième séquence, contrebalancé entre les participants). Les pentes de régression calculées pour chaque séquence sont représentées en rouge. Le dégradé vert en arrière-plan délimite quatre sous-blocs (voir les analyses subséquentes). Les barres d'erreur correspondent à ± 1 Erreur Standard.

Temps de réponse En vue de l'analyse de l'effet SPoARC, une seconde winsorisation a été exécutée, cette fois-ci en tenant uniquement compte des temps de réponse obtenus aux essais positifs (i.e., des essais pour lesquels les participants devaient identifier des items cibles). Cette *winsorisation* a été appliquée à 4.1 % des temps de réponse. Le temps de réaction moyen sur l'ensemble de la tâche était égal à 640 ms (ET = 248

[4] Il convient de noter que des modèles de régression logistique ont également été effectués pour tester une éventuelle augmentation de la précision des réponses (codée 1 en cas de réponse correcte, contre 0 pour une réponse incorrecte) en fonction du numéro d'essai. Ces modèles n'ont pas montré d'amélioration significative de la performance, que ce soit pour la première séquence (β = 0.01, z = 0.89, p = .452, $\beta Std.$ = 0.11) ou pour la deuxième (β = 0.01, z = 0.89, p = .373, $\beta Std.$ = 0.12) ; mais également en considérant les données divisées par bloc (β = 0.02, z = 0.84, p = .404, $\beta Std.$ = 0.11 pour le Bloc 1 et β = 0.02, z = 0.75, p = .455, $\beta Std.$ = 0.11 pour le Bloc 2). Là où la répétition de la séquence a conduit à un gain de rapidité au fil des essais, notamment dans le premier bloc, un tel bénéfice ne s'est pas observé sur la précision des réponses, qui a pu rapidement atteindre un plateau dès le début de la tâche.

ms). Les temps de réponse moyens pour chaque bloc étaient respectivement égaux à 661 ms (ET = 252 ms) et à 618 ms (ET = 243 ms). Une analyse de corrélation entre les temps de réponse et le taux de réussite a montré que les participants ne tendaient pas à commettre plus d'erreurs lorsqu'ils répondaient plus rapidement ($\rho = .29$, $p = .082, N = 37$).

4.2.4.1 Effet de spatialisation : Modèles linéaires mixtes généralisés

La présence d'un effet SPoARC a d'abord été examinée à l'aide de modèles linéaires mixtes généralisés. La distribution des temps de réponse présentant une asymétrie positive (voir la Figure D.1 en Annexe D), une distribution Gamma a été utilisée comme distribution de référence dans l'analyse. Les modèles ont été élaborés sur la base de trois facteurs d'intérêts : la position de l'item dans la séquence (quatre niveaux : 1, 2, 3 et 4), la main de réponse (deux niveaux : droite et gauche) et le bloc (deux niveaux : bloc 1, correspondant aux 8 premiers essais positifs que les participants ont complétés sur chaque session, et bloc 2 pour les 8 essais positifs suivants). Deux facteurs aléatoires (Sujet et Item) ont également été pris en compte dans cette analyse. Les modèles ont été conçus comme suit : un premier modèle rendait uniquement compte de l'effet du facteur Sujet ($M0_R$). Ce modèle dégénéré a été progressivement enrichi avec le second facteur aléatoire ($M1_R$), suivi des facteurs d'intérêt ajoutés un à un ($M2_R$ à $M4_R$). Par la suite, les effets d'interaction ont été modélisés, en commençant par toutes les interactions de premier ordre ($M5_R$ à $M7_R$), pour aboutir au modèle final tenant compte de l'interaction des trois facteurs d'intérêt ($M8_R$). Une description de chaque modèle développé pour cette analyse est fournie dans le Tableau D.2 en Annexe D.

Dans cette analyse, le modèle présentant l'AIC le plus faible était le modèle $M5_R$ (voir le Tableau D.3 en Annexe D pour le classement par l'AIC). Ce modèle tenait compte de l'interaction Position × Main caractéristique du SPoARC. Par ailleurs, les résultats ont indiqué que la vraisemblance de ce modèle ne différait pas significativement de celle du modèle classé en deuxième position ($M8_R$, $\chi^2(3) = 5.11$, $p = .164$). Ce deuxième modèle a donc été retenu pour nos analyses, dans la mesure où il intégrait une interaction de plus grand intérêt pour cette étude (i.e., l'interaction Position × Main × Bloc, attestant d'une modulation du SPoARC par le nombre de répétitions) et qu'il différait significativement du modèle classé en troisième position ($M7_R$, $\chi^2(3) = 11.24$, $p = .011$).

L'analyse détaillée du modèle $M8_R$ a tout d'abord montré un effet principal de la position de l'item sur les temps de réponse, ces derniers s'avérant plus rapides à mesure que les items étaient tardifs (m_{P1} = 668 ms, ET = 262 ms, m_{P2} = 642 ms, ET = 231 ms, m_{P1} = 650 ms, ET = 263 ms et m_{P4} = 600 ms, ET = 233 ms ; $t(1087) = -7.69$, $p < .001$, $Std.\beta = -39.52$). Un effet principal de la main de réponse a également été

identifié, avec des temps de réponse significativement plus rapides pour la main droite que pour la main gauche (m_D = 631 ms, ET = 258 ms, m_G = 648 ms, ET = 239 ms ; $t(1087) = -3.22$, $p = .001$, $Std.\beta = 33.32$). Les temps de réponse différaient également en fonction du bloc, les participants étant significativement plus rapides pour la seconde moitié des répétitions (m_{B1} = 661 ms, ET = 251 ms, m_{B2} = 618 ms, ET = 243 ms ; $t(1087) = -4.50$, $p < .001$, $Std.\beta = -26.43$).

Une interaction significative entre la position de l'item dans la séquence et le numéro de bloc a été observée dans nos résultats ($t(1087) = 2.48$, $p = .013$, $Std.\beta = 14.53$), tandis que l'interaction Main × Bloc ne s'est pas avérée significative (voir le Tableau D.4 pour un résumé des statistiques du modèle $M8_R$). De manière critique pour nos hypothèses, les résultats ont mis en évidence une interaction significative entre la position de l'item et la main de réponse, suggérant la présence d'un effet SPoARC ($t(1087) = 5.52$, $p < .001$, $Std.\beta = 33.67$). D'un plus grand intérêt pour la présente étude, les analyses ont montré que l'effet différait significativement en fonction du numéro de bloc, avec une manifestation du SPoARC visible uniquement dans la première partie de la tâche ($t(1087) = -2.35$, $p = .019$, $Std.\beta = -17.78$, voir la Figure 4.2). Le Tableau D.5 en Annexe D reporte les temps de réponse moyens obtenus pour chaque position et chaque main de réponse, d'abord pour l'ensemble de la tâche, puis pour chaque bloc séparément.

4.2.4.2 Effet de spatialisation : régression linéaire

La présence d'un SPoARC dans cette huitième étude a ensuite été étudiée par une analyse de régression linéaire, exécutée sur la différence des temps de réponse entre la main droite et la main gauche (d_{TR}). Pour l'ensemble de la tâche, les résultats ont indiqué que les d_{TR} diminuaient en moyenne de 16 ms par position, sans que le coefficient de régression ne diffère significativement de zéro ($d_{TR-P1} = -0.24$ ms, ET = 139 ms, $d_{TR-P2} = -9$ ms, ET = 175 ms, $d_{TR-P3} = -35$ ms, ET = 162 ms, $d_{TR-P4} = -45$ ms, ET = 159 ms ; $t(144) = -1.66$, $p = .10$, $Std.\beta = -0.11$). La même analyse a été menée en considérant uniquement la première et la dernière position, sans que les résultats ne s'avèrent significatifs non plus ($\beta = -45$, $t(70) = -1.59$, $p = .117$, $Std.\beta = -0.15$). Des tests t opposant chaque d_{TR} à une moyenne théorique de zéro ont ensuite été exécutés pour chaque position séparément, révélant uniquement un effet marginal pour la quatrième position ($t(36) = -1.73$, $p = .092$, d de Cohen = -0.29). Les tests relatifs aux trois premières positions ne se sont pas avérés significatifs (tous les $|t| \leq 1.32$, tous les $p \geq 0.19$, tous les $|d|$ de Cohen ≤ 0.22).

Des régressions ont ensuite été exécutées sur chaque bloc séparément pour déterminer si les pentes de spatialisation différeraient entre la première et la deuxième partie de la tâche. Un effet SPoARC a pu être identifié en considérant uniquement les données

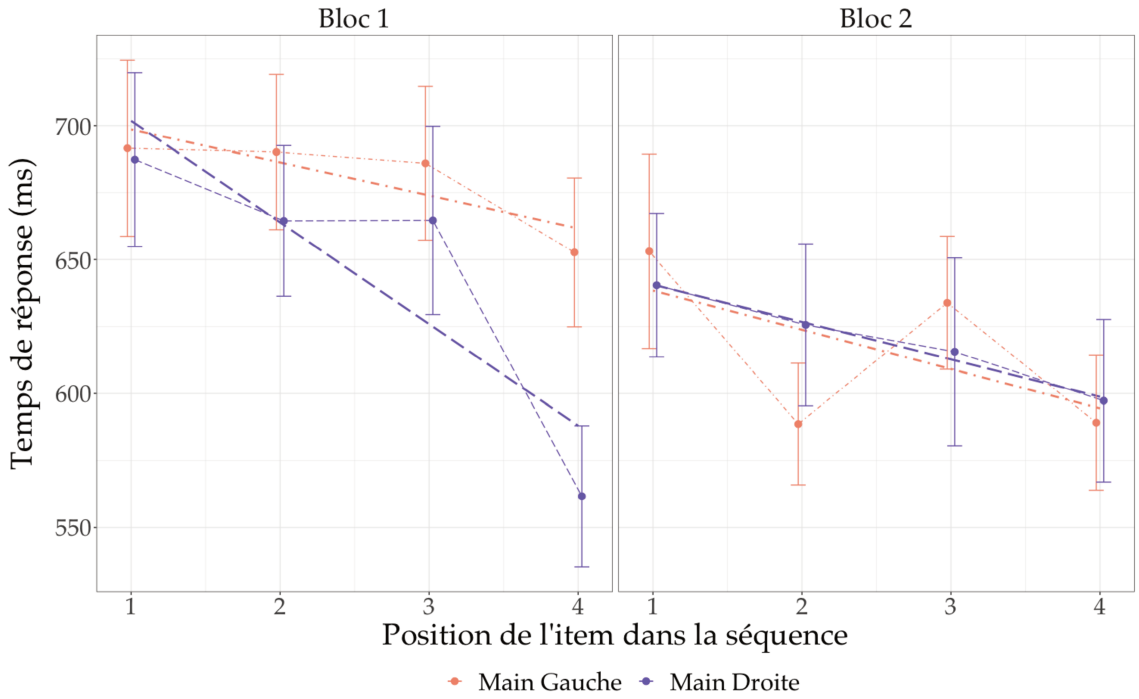


FIGURE 4.2 – Moyenne et régression linéaire des temps réponse (exprimés en millisecondes) en fonction de la position de l'item dans la séquence, de la main de réponse et du bloc pour les données répétées de l'Expérience 8. *Note.* Les barres d'erreur correspondent à ± 1 Erreur Standard.

du premier bloc. Dans cette condition, les d_{TR} diminuaient significativement de 29 ms en moyenne (d_{TR-P1} = 21 ms, ET = 165 ms, d_{TR-P2} = −39 ms, ET = 206 ms, d_{TR-P3} = −37 ms, ET = 219 ms, d_{TR-P4} = −79 ms, ET = 196 ms, $t(142) = -2.14$, $p = .034$, $Std.\beta = -0.16$, voir la Figure 4.3). En revanche, aucun effet n'a pu être détecté en considérant les données du deuxième bloc (d_{TR-P1} = −22 ms, ET = 262 ms, d_{TR-P2} = 25 ms, ET = 224 ms, d_{TR-P3} = −47 ms, ET = 196 ms, d_{TR-P4} = −20 ms, ET = 176 ms, $\beta = -5$, $t(142) = -0.39$, $p = .70$, $Std.\beta = -0.03$). Cette absence d'effet s'est confirmée en cantonnant l'analyse de régression aux deux positions les plus extrêmes ($\beta = 2$, $t(70) = .05$, $p = .957$, $Std.\beta < 0.01$), ou en opposant la moyenne des d_{TR} à une moyenne théorique de zéro pour chaque position séparément (tous les $|t| \leq 1.46$, tous les $p \geq 0.15$, tous les $|d|$ de Cohen ≤ 0.24, voir la Figure 4.3).

4.2.4.3 Analyse exploratoire : découpage par sous-blocs

En accord avec nos hypothèses, les résultats de cette huitième étude ont indiqué que la manifestation du SPoARC dépendait du nombre de répétitions de la séquence, dans la mesure où l'effet était uniquement détectable dans la première moitié de la

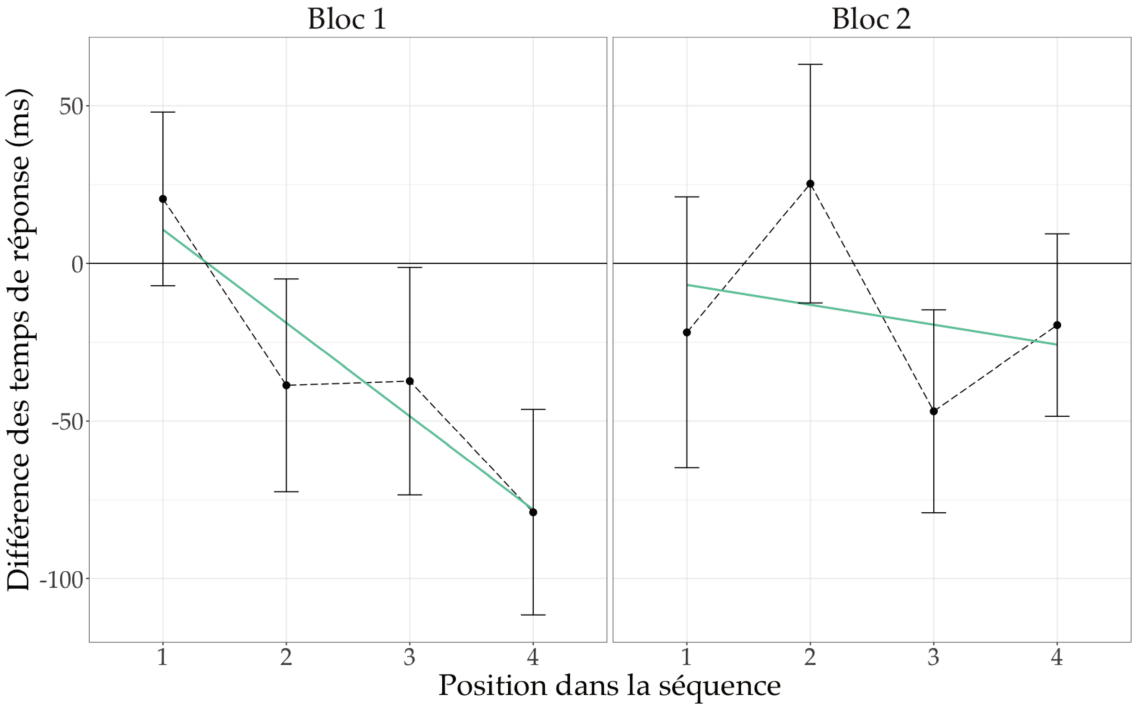


FIGURE 4.3 – Régression linéaire de la différence des temps de réponse moyens (d_{TR}) entre main droite et main gauche en fonction de la position de l'item et du bloc pour les données répétées de l'Expérience 8. *Note.* La séparation entre les deux blocs est intervenue à mi-parcours de chaque session expérimentale, à l'insu des participants. La figure a été réalisée sur les données agrégées par position, par sujet et par session expérimentale, et les barres d'erreur correspondent à ± 1 Erreur Standard.

tâche (Essais 1 à 16), avant que la consolidation de la série ne conduise à une diminution de la spatialisation. Par ailleurs, l'analyse essai par essai des temps de réponse (voir les Analyses préliminaires) ne nous a pas permis d'identifier un numéro d'essai précis à partir duquel l'apprentissage tendait à se stabiliser. Ainsi, il demeure possible que l'apprentissage sériel soit survenu à un stade plus précoce que celui anticipé par notre découpage en 16 essais. De plus, l'Expérience 5 de cette thèse (voir le Chapitre 3) a montré qu'une série de huit tests successifs (pouvant induire huit balayages successifs d'une séquence donnée) pouvait être suffisante pour provoquer une diminution de l'intensité du SPoARC (bien que, encore une fois, l'interférence causée par ces multiples tests puisse également expliquer cette observation). Au regard de nos résultats, la question se pose donc de savoir si huit répétitions auraient suffi à consolider l'information sérielle en mémoire et, par conséquent, à entraîner une disparition plus précoce de la spatialisation.

Pour répondre à cette question, l'analyse essai par essai des temps de réponse a été approfondie pour déterminer si les temps de réaction diminuaient davantage pendant la première (Essais 1 à 8), la deuxième (Essais 9 à 16), la troisième (Essais 17 à 24) ou la quatrième partie de la tâche (Essais 25 à 32). À cette fin, une pente de régression des temps de réponse en fonction du numéro d'essai a été calculée pour ces quatre sous-blocs. Les résultats ont indiqué que la première pente était celle qui présentait le coefficient de régression le plus fort, bien que l'effet ne soit qu'à la limite du seuil de significativité ($\beta = -6$, $t(586) = -1.94$, $p = .053$, $Std.\beta = -0.05$). La limite de significativité pour ce premier bloc est par ailleurs explicable par le moindre nombre d'essais pris en compte dans le calcul. Les pentes obtenues pour les deuxième, troisième et quatrième sous-blocs n'ont pas atteint le seuil de significativité ($\beta = -2$, $t(587) = -0.64$, $p = .52$, $Std.\beta = -0.02$; $\beta = -3$, $t(586) = -0.97$, $p = .332$, $Std.\beta = -0.03$ et $\beta = 0.04$, $t(587) = 0.01$, $p = .989$, $Std.\beta < 0.01$ respectivement). Bien que non significatifs, ces résultats suggèrent néanmoins que les participants ont présenté un apprentissage plus marqué lors du premier quart de la tâche, remettant par ailleurs en question notre segmentation artificielle en deux blocs de 16 essais chacun.

Modèles linéaires mixtes généralisés Afin de mieux tenir compte du pattern d'apprentissage observé dans nos résultats, une analyse complémentaire du SPoARC a été effectuée en considérant les données divisées en quatre sous-blocs. Des modèles linéaires mixtes généralisés ont été de nouveau implémentés en tenant compte du facteur Sous-bloc en lieu et place du facteur Bloc (voir le Tableau D.2 en Annexe D). Le modèle classé premier ($M5_{SB}$) ne différait pas significativement du modèle classé en deuxième position ($M8_{SB}$, $\chi^2(3) = 3.76$, $p = .29$). Ce deuxième modèle a donc été retenu pour l'analyse, dans la mesure où il différait significativement du modèle classé en troisième position ($M4_{SB}$, $\chi^2(4) = 12.98$, $p = .011$), et qu'il rendait compte

d'une variation de l'effet SPoARC entre les quatre sous-blocs. Les résultats du modèle $M8_{SB}$ ont indiqué un effet significatif de la position ($\beta = -45.85$, $ES = 8.55$, $t(1087) = -5.36$, $p < .001$, $Std.\beta = -32.06$), de la main de réponse ($\beta = -73.79$, $ES = 27.47$, $t(1087) = -2.69$, $p = .007$, $Std.\beta = 20.48$) et du sous-bloc ($\beta = -32.70$, $ES = 8.82$, $t(1087) = -3.71$, $p < .001$, $Std.\beta = -16.76$) sur les temps de réaction. Le numéro de sous-bloc s'est avéré interagir significativement avec la position de l'item ($\beta = 6.89$, $ES = 3.26$, $t(1087) = 2.11$, $p = .035$, $Std.\beta = 8.30$) mais pas avec la main de réponse ($\beta = 15.38$, $ES = 10.27$, $t(1087) = 1.50$, $p = .134$, $Std.\beta = -7.49$). Une interaction significative entre la main de réponse et la position de l'item a été mise en évidence, indiquant la présence d'un effet SPoARC ($\beta = 43.92$, $ES = 11.31$, $t(1087) = 3.88$, $p < .001$, $Std.\beta = 24.39$). D'un plus grand intérêt pour cette étude, l'interaction entre la main, la position et le sous-bloc a également atteint le seuil de significativité ($\beta = -8.78$, $ES = 4.11$, $t(1087) = -2.14$, $p = .033$, $Std.\beta = -10.64$), indiquant que le SPoARC différait significativement en fonction du sous-bloc considéré. Les temps de réponse moyens obtenus pour chaque position et chaque main de réponse sont fournis pour les quatre sous-blocs séparément dans le Tableau D.6 en Annexe D.

Régression linéaire La présence d'un SPoARC a ensuite été étudiée dans chacun des quatre sous-blocs à l'aide d'une analyse de régression linéaire. Cette analyse a indiqué que seule la pente calculée pour le premier sous-bloc reflétait un SPoARC significatif ($\beta = -62$, $t(72) = -3.27$, $p = .002$, $Std.\beta = -0.32$, voir la Figure 4.4). Aucun effet n'a été détecté dans les trois sous-blocs suivants (voir le Tableau 4.2 pour des résultats détaillés). Cette analyse complémentaire a donc révélé que la spatialisation s'est effectivement estompée précocement, dans la mesure où aucun effet n'était visible à partir du deuxième quart de la tâche. Cependant, une telle analyse post-hoc doit être considérée avec prudence car cette division en quatre sous-blocs n'était pas planifiée a priori. De ce fait, les données de chaque sous-bloc ne contenaient pas un nombre égal de positions testées, une différence susceptible de déséquilibrer le poids de chaque d_{TR} et diminuer la fiabilité des pentes de spatialisation.

4.2.4.4 Comparaison avec des données non-répétées

Les résultats obtenus dans notre tâche répétée ont ensuite été comparés à ceux d'une étude antérieure conduite au sein de notre laboratoire (Vivion et al., 2025b, Expérience 1). Le principal objectif de cette analyse supplémentaire était de rendre compte de la variation du SPoARC dans une tâche impliquant la présentation de séquences nouvelles (i.e., dont l'ordre varie d'un essai à l'autre). En effet, notre hypothèse principale stipulait que le SPoARC différerait en fonction de la consolidation de l'information sérielle. Ainsi, nous nous attendions à ce que plus la séquence était répétée

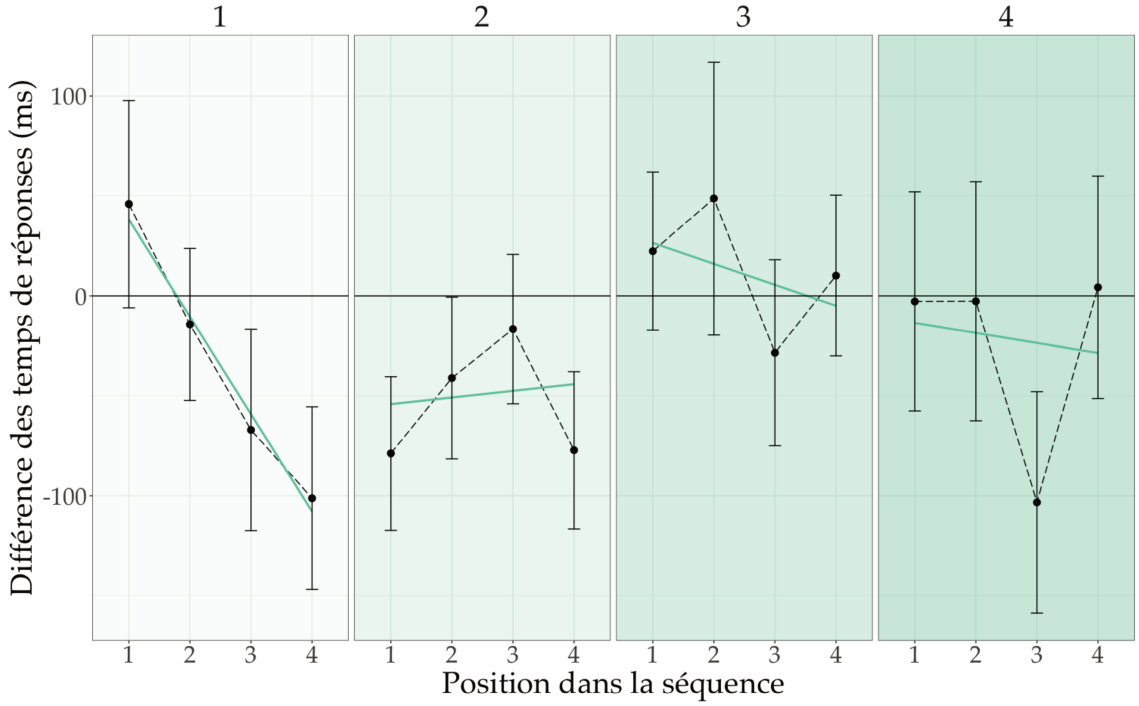


Figure 4.4 – Régression linéaire de la différence des temps de réponse moyens (d_{TR}) entre main droite et main gauche en fonction de la position de l'item et du sous-bloc pour l'Expérience 8. *Note.* Le dégradé vert en arrière-plan délimite quatre sous-blocs consécutifs. La figure a été réalisée sur les données agrégées par position, par sujet et par session expérimentale, et les barres d'erreur correspondent à ± 1 Erreur Standard.

Tableau 4.2 – Différence moyenne des temps de réponse (et écart-type) en fonction de la position dans la séquence, incluant les coefficients de régression, valeurs p et tailles d'effet des modèles linéaires exécutés pour chaque sous-bloc de l'Expérience 8

Sous-bloc	Position	d_{TR} (ET)	β	p	*Std.*β	p (1 *vs.* 4)	*Std.*β (1 *vs.* 4)
1	1	46 (194)	-61.50	.002	-0.32	$< .001$	-0.41
	2	-14 (178)					
	3	-67 (225)					
	4	-101 (205)*					
2	1	-79 (159)	-4.92	.737	-0.03	.977	-0.01
	2	-41 (202)					
	3	-17 (187)					
	4	-77 (167)					
3	1	22 (181)	-19.13	.296	-0.10	.330	-0.11
	2	49 (273)					
	3	-29 (224)					
	4	10 (193)					
4	1	-3 (219)	-7.16	.760	-0.03	.947	-0.01
	2	-3 (293)					
	3	-103 (222)					
	4	4 (261)					

Note. L'astérisque dans la colonne d_{TR} indique que la valeur associée différait significativement de zéro. Les résultats fournissent également la valeur p et la taille d'effet associée au modèle linéaire incluant uniquement les positions extrêmes (1 *vs.* 4).

dans notre tâche, moins les participants spatialiseraient l'information en mémoire de travail. Cependant, un facteur confondu dans notre étude est lié au fait que la disparition de la spatialisation au fil des essais pourrait simplement être attribuée à des facteurs temporels, indépendamment de l'apprentissage de la série (en raison de facteurs tels que la fatigue ou l'habituation). De ce fait, et étant donné que l'évolution du SPoARC au cours d'une tâche de spatialisation n'a jamais été rapportée auparavant dans la littérature, une comparaison plus fine de la trajectoire de l'effet dans un contexte non répété s'avère pertinente pour mieux éprouver nos résultats. Les données de Vivion et al. (2025b) ont été ici préférées à celles de la condition Mono-image de l'Expérience 5, dans la mesure où leur étude comprenait un plus grand échantillon (i.e., 35 participants, au lieu de 31 dans l'Expérience 5)footnote Dans une logique similaire, les données de ces deux études n'ont pas été groupées afin que nos comparaisons entre données répétées et non-répétées reposent sur des échantillons de taille comparable..

Les résultats de cette analyse ont montré un SPoARC significatif sur l'ensemble de la tâche, les d_{TR} diminuant en moyenne de 43 ms par position (d_{TR-P1} = 24 ms, ET = 291 ms, d_{TR-P2} = −32 ms, ET = 274 ms, d_{TR-P3} = −35 ms, ET = 247 ms, d_{TR-P4} = −120 ms, ET = 210 ms ; $t(136) = -2.49$, $p = .014$, $Std.\beta = -0.19$). L'analyse par bloc a par ailleurs révélé un SPoARC uniquement marginal pour la première partie de la tâche non-répétée (d_{TR-P1} = 8 ms, ET = 266 ms, d_{TR-P2} = 43 ms, ET = 400 ms, d_{TR-P3} = −54 ms, ET = 343 ms, d_{TR-P4} = −95 ms, ET = 332 ms ; $\beta = -43$, $t(113) = -1.71$, $p = .089$, $Std.\beta = -0.15$) ; tandis qu'une pente significative a été observée pour la deuxième moitié des essais (d_{TR-P1} = 70 ms, ET = 295 ms, d_{TR-P2} = −47 ms, ET = 403 ms, d_{TR-P3} = −61 ms, ET = 381 ms, d_{TR-P4} = −151 ms, ET = 340 ms ; $\beta = -66$, $t(106) = -2.28$, $p = .025$, $Std.\beta = -0.21$). Nos résultats indiquant déjà une progression temporelle de la spatialisation fondamentalement différente dans la condition non-répétée (i.e., une installation de la spatialisation) par rapport à la condition répétée (i.e., une diminution de la spatialisation), ce pattern n'a pas été réexaminé dans une analyse par sous-bloc. Le détail des analyses exécutées sur ces données comparatives est disponible en Annexe D (voir l'Analyse D.1).

4.2.4.5 Spatialisation et apprentissage

Une dernière série d'analyses a cherché à examiner la relation entre spatialisation et apprentissage dans nos données répétées. Une première analyse s'est attachée à comparer la courbe d'apprentissage de chaque participant (correspondant au coefficient de la pente de régression de ses temps de réponse en fonction du numéro d'essai/du nombre de répétitions de la séquence) en fonction d'un indice de spatialisation (correspondant au coefficient de la pente de régression de la différence de temps de réponse entre les deux mains en fonction de la position de l'item dans la séquence). Le coefficient de

régression des temps de réponse en fonction du numéro d'essai est référé sous le terme d'*indice d'apprentissage* dans la suite de cette analyse. Plus la valeur de cet indice est négative, plus l'indice témoigne d'un apprentissage marqué de la séquence mémorisée. Le SPoARC ayant été détecté uniquement dans la première partie de la tâche, les indices de spatialisation ont été calculés en tenant compte des données issues du premier bloc. Sous l'hypothèse qu'une plus forte spatialisation dans la première partie de la tâche permettrait une meilleure consolidation de la séquence, il était attendu que des pentes d'apprentissage plus prononcées soient corrélées à un effet SPoARC plus élevé. Dans un premier temps, l'analyse a été exécutée sur les indices de spatialisation en valeur absolue. Une telle démarche visait à tenir compte de la magnitude de l'effet indépendamment de son orientation pour identifier si la spatialisation des items permettrait une meilleure consolidation, qu'ils aient été codés de gauche à droite ou de droite à gauche. L'indice d'apprentissage moyen était égal à -2.5 ($ET = 2.41$, $min = -8.04$, $max = 2.38$) et l'indice de spatialisation moyen en valeur absolue était égal à 60.51 ($ET = 48.53$, $min = 4.38$, $max = 189.34$). Les résultats ont indiqué que les participants ayant spatialisé en début de tâche présentaient également une plus forte courbe d'apprentissage. Cependant, le lien entre ces deux variables s'est avéré marginalement significatif ($\rho = -0.29, p = .079, N = 37$).

Une deuxième analyse a tenté d'approfondir ces résultats en excluant les participants identifiés comme spatialiseurs inverses par le biais d'une analyse bootstrap (comme dans les analyses précédentes, permettant le calcul d'intervalles de confiance à 80% de la pente empirique de chaque participant par le biais de 5000 rééchantillonnages). Cinq participants ont ainsi été écartés de l'échantillon[5]. Les indices de spatialisation ont été considérés dans leur valeur relative (i.e., un coefficient plus fortement négatif renvoyant à une plus forte spatialisation *de gauche à droite*). Dans ce sous-groupe, l'indice d'apprentissage moyen était égal à -2.5 ($ET = 2.3$, $min = -8.04$, $max = 2.38$) et l'indice de spatialisation moyen était égal à -44.06 ($ET = 48.45$, $min = -149.84$, $max = 54.29$). Les résultats obtenus sur cet échantillon restreint ont montré une relation significative entre l'indice de spatialisation et l'indice d'apprentissage des participants : les individus ayant présenté une plus forte spatialisation gauche-droite en début de tâche tendaient également à présenter une plus forte courbe d'apprentissage au fil des répétitions ($r = .39, p = .027, N = 32$, voir la Figure 4.5). Une telle relation n'était par ailleurs pas visible en tenant compte des indices de spatialisation obtenus pendant le deuxième bloc, que ce soit en tenant compte des spatialiseurs inverses

[5] Outre ces cinq spatialiseurs inverses, l'analyse bootstrap a révélé que 18 participants pouvaient être considérés comme spatialiseurs gauche-droite (soit 49% de l'échantillon), tandis que les 14 participants restants ont été catégorisés comme non-spatialiseurs (39% de l'échantillon). La répartition des participants entre ces trois profils s'est avérée différente du hasard ($\chi^2(2) = 7.19$, $p = .028$, W de Cohen = 0.44). Le test binomial visant a tester si les spatialiseurs gauche-droite étaient plus nombreux que les spatialiseurs inverses s'est également avéré significatif (18 spatialiseurs gauche-droite sur 23 spatialiseurs, $p = .005$, h de Cohen = 0.43).

($\rho = -0.18, p = .277, N = 37$) ou en tenant ces participants en dehors de l'analyse ($r = .23, p = .210, N = 32$).

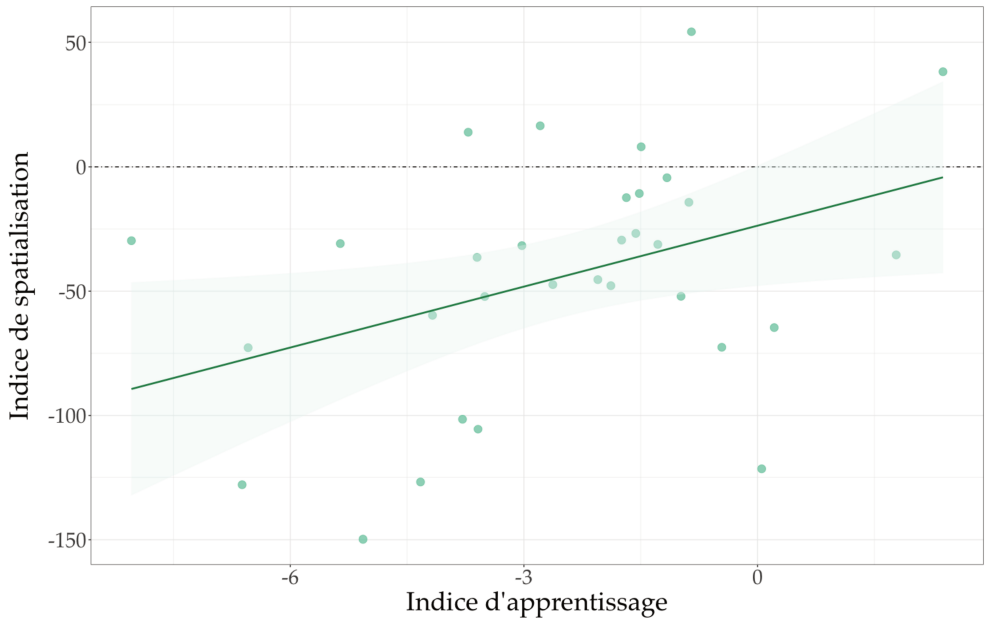


Figure 4.5 – Corrélation entre l'indice de spatialisation dans le premier bloc et l'indice d'apprentissage des participants de l'Expérience 8. *Note.* Une indice de spatialisation de plus en plus proche de zéro renvoie à un SPoARC d'une plus faible intensité ; un indice d'apprentissage de plus en plus négatif représente un apprentissage plus marqué.

Une dernière approche visait à mettre en lien la spatialisation et la consolidation à long terme sur la base des performances au rappel libre et au rappel indicé survenu un mois après la tâche de spatialisation. Dans un premier temps, une corrélation a été exécutée entre les indices de spatialisation en début de tâche et le nombre d'items correctement rappelés par les participants lors du test spontané. Cette analyse a été exécutée d'abord sur le nombre total d'items rappelés, sans considération de leur position dans la séquence. Les résultats n'ont montré aucune relation significative, que ce soit en tenant compte des spatialiseurs inverses ($\rho = -.16, p = .38, N = 34$) ou en écartant ces participants de l'analyse ($r = .08, p = .64, N = 30$). Cette absence d'effet a aussi été observée en tenant compte du nombre total d'items rappelés à leur bonne position ($\rho = .04, p = .84, N = 34$ en tenant compte des spatialiseurs inverses, et $\rho = -.16, p = .39, N = 30$ en écartant ces participants de l'échantillon). Enfin, des tests exacts de Fisher ont été réalisés afin de déterminer si la distribution des participants ayant correctement identifié soit deux, une ou aucune séquence lors du rappel indicé différait significativement selon leur profil de spatialisation. Les résultats n'ont pas montré de lien entre les deux distributions, que ce soit en distinguant les trois profils de spatialisation ($p = .24$, voir le Tableau D.7 en Annexe D), en considérant une répartition binaire des participants sur la base d'une présence ou d'une absence

de spatialisation (indépendamment de son orientation, $p = .33$) ou en opposant les spatialiseurs gauche-droite au reste de l'échantillon ($p = .82$)

4.2.5 Discussion

En présentant une information sérielle de manière répétée dans une tâche de spatialisation, cette huitième étude visait à examiner la stabilité de l'effet SPoARC lors de la consolidation mnésique. Nous avions émis l'hypothèse que les séquences répétées proposées dans notre protocole influenceraient le recours à une spatialisation en mémoire de travail : en considérant le SPoARC comme un mécanisme fonctionnel, utilisé temporairement pour optimiser l'encodage de l'ordre d'informations verbales, nous postulions que le recours à un traitement spatial d'une série sur-apprise s'avérerait superflu pour le système cognitif, lequel pourrait privilégier un traitement global de la séquence. Par conséquent, nous envisagions que l'effet s'estomperait à mesure des répétitions, du fait de la disparition d'une représentation spatiale différenciée des items en mémoire. En accord avec ces hypothèses, nos résultats suggèrent que la spatialisation tend à s'estomper lorsque l'information sérielle fait l'objet d'un apprentissage répété, dans la mesure où la consolidation d'une unique séquence au fil des essais a conduit à l'extinction de l'effet SPoARC dans notre tâche. En effet, là où une analyse globale (i.e., effectuée sur les données de l'ensemble de la tâche) n'a pas permis l'identification d'une spatialisation, un découpage en deux blocs successifs – séparant le début et la fin de l'apprentissage – a permis d'observer la présence d'un effet dans le premier bloc, tandis que la spatialisation n'était plus visible dans la seconde moitié de la tâche. Ce résultat confirme par ailleurs l'hypothèse selon laquelle le début de l'apprentissage sériel serait caractérisé par la présence d'une spatialisation en raison d'une association temporaire entre item et position en mémoire. Cette trajectoire a également pu être précisée grâce à une segmentation plus fine de nos données : bien qu'exploratoire, l'analyse par sous-bloc a montré qu'une série de huit répétitions était suffisante pour conduire à la disparition de l'effet, dans la mesure où le SPoARC n'était plus visible à partir du deuxième quart de la tâche. Bien que la fiabilité de ce dernier résultat puisse être questionnée du fait d'une répartition non équitable des données par position dans chacun de ces sous-blocs, ce découpage plus fin laisse envisager un déclin précoce de la spatialisation à mesure que l'information sérielle est consolidée en mémoire à long terme.

Il s'avère qu'une interprétation fondée sur la création de chunks en mémoire pourrait rendre compte de la disparition du SPoARC observée dans cette étude. Selon Guida et Campitelli (2019), la ligne mentale structurée en slots sous-tendant l'effet SPoARC peut s'apparenter (dans une dimension beaucoup moins complexe néanmoins)

aux structures de récupération modélisées dans le champ de l'expertise mnésique (Ericsson & Kintsch, 2000 ; Gobet, 2000a, 2000b). La littérature montre également que ces structures de récupération peuvent aisément contenir des chunks. Par exemple, Chase et Ericsson (1982) ont pu décrire la manière dont *SF* (un athlète présentant un haut niveau d'expertise dans la connaissance de records de course à pied) était capable de recoder des informations numériques aléatoires en les assimilant à des temps de course, pour organiser ensuite ces unités signifiantes au sein d'une structure de récupération et augmenter considérablement ses capacités mnésiques. En considérant que la mémoire de travail s'appuie sur une telle structure mentale pour coder l'ordre sériel (Guida & Lavielle-Guida, 2014 ; Guida & Campitelli, 2019), nous proposons que les associations spatio-positionnelles dans notre étude ont pu évoluer graduellement avec la consolidation de la séquence de la manière suivante. Premièrement, une spatialisation était visible au début de notre tâche : une explication possible est que, lors des premières répétitions, les items de la séquence étaient initialement codés sur la ligne mentale, chaque élément étant assigné à un slot distinct, et donc, associé à une coordonnée spatiale distincte (de la même manière que pour des items présentés dans un ordre aléatoire d'un essai à l'autre). À mesure des répétitions, la séquence a pu être transférée en mémoire à long terme. Cette supposition trouve appui dans plusieurs de nos résultats : tout d'abord, nos participants étaient globalement plus rapides au fil des essais, et ce dans les deux sessions expérimentales[6]. De plus, cette régression des temps de réaction s'est avérée particulièrement saillante dans la première partie de la tâche (correspondant au Bloc 1 – Essais 1 à 16 – dans l'analyse par bloc ou au Sous-bloc 1 – Essais 1 à 8 – dans l'analyse exploratoire en quatre blocs), les essais ultérieurs reflétant davantage une stabilisation des réponses. Cette dynamique pourrait traduire une automatisation progressive de la séquence lors des premiers essais, conduisant à une identification plus rapide des cibles et des leurres dans la phase de reconnaissance, suivie d'un plateau reflétant la stabilisation de la trace mnésique en mémoire à long terme. Un deuxième résultat appuyant l'idée d'une consolidation à long terme concerne le fait qu'au moins une des deux séquences mémorisées était toujours accessible à une majorité de nos participants un mois après l'expérience, laissant supposer que l'information sérielle avait été codée de manière durable lors de la tâche de spatialisation. Dans la mesure où de précédentes études ont montré que l'apprentissage sériel résulte en la formation de chunks en mémoire (voir Smalle et al., 2016, pour un exemple lié à l'effet de répétition de Hebb), nous pensons que les items que les participants devaient mémoriser ont été progressivement regroupés en une seule unité. Ce chunk unique, stocké en mémoire à long terme, aurait été alors réactivé en mémoire de travail au moment du test, par l'intermédiaire d'un unique marqueur positionnel pointant vers l'intégralité

[6] Il est à noter qu'une diminution des temps de réponse était également visible dans la tâche non-répétée qui a servi de tâche contrôle. Cependant, un tel pattern n'a été relevé que pour la deuxième session expérimentale.

de la séquence. Là où le processus de chunking permet de réduire la charge mnésique en groupant l'information (Cowan, 2001 ; Mathy & Feldman, 2012 ; Miller, 1956), nous présumons que ce même processus s'applique à la spatialisation : un principe économique pourrait conduire le système cognitif à coder un chunk sous une seule coordonnée spatiale, témoignant d'une unification des marqueurs positionnels initialement associés aux items individuels.

En montrant que l'effet SPoARC diminue au fil des essais, les résultats de cette huitième étude suggèrent que la consolidation de l'information sérielle favorise le passage d'un traitement spatial item-par-item à un traitement spatial global de la séquence mémorisée. Néanmoins, cette interprétation ne demeure valable que si la disparition de l'effet au fil des essais se limite à un contexte expérimental répété, dans la mesure où le SPoARC pourrait fluctuer simplement en raison de facteurs temporels. Par ailleurs, l'analyse comparative exécutée sur des données non-répétées (tirées de Vivion et al., 2025b, Exp.1) a montré qu'une telle trajectoire n'est pas observable lorsque des participants codent à chaque essai de nouvelles séries d'items. Une spatialisation significative a pu être observée dans cette condition expérimentale au cours d'une analyse globale des données. De plus, un découpage des données en deux blocs successifs a montré que le SPoARC était plus saillant non pas au début mais à la fin de la tâche, soit l'exact opposé du pattern relevé dans nos données répétées. Ce résultat suggère premièrement que la disparition du SPoARC au fil des essais dans notre tâche répétitive ne se réduit pas au simple passage du temps, auquel cas une diminution comparable aurait été visible dans le deuxième bloc de la condition non-répétée. D'autre part, l'observation d'un effet plus saillant dans les derniers essais de la tâche utilisant des séquences non-répétées pourrait constituer un argument supplémentaire à l'encontre de l'hypothèse fondée sur le caractère automatique de la spatialisation (voir l'Introduction de ce chapitre). En effet, une telle hypothèse impliquerait que la spatialisation opère sans délai dès les premiers essais, signe d'une assignation immédiate de marqueurs spatiaux aux différents items mémorisés. À l'inverse, les données non-répétées suggèrent que la spatialisation n'opère pas spontanément en mémoire de travail, questionnant ainsi l'automaticité du phénomène. Néanmoins, il convient de noter que la non-détection de l'effet dans le premier bloc de la condition comparative non-répétée pourrait simplement résulter de temps de réponse plus fluctuants, les participants ayant pu nécessiter davantage de temps pour traiter des informations sérielles aléatoires, ce qui aurait rendu leurs réponses initiales moins homogènes que dans la tâche répétée. Par conséquent, la variabilité plus importante des données dans la condition non-répétée aurait pu limiter la détection initiale de la spatialisation, dont la présence reste par ailleurs suggérée par une pente marginalement significative. À mesure que les participants progressaient dans la tâche non-répétée, la réduction de la variabilité des temps de réponse aurait alors pu favoriser une meilleure détection de la spatialisation, justifiant qu'une pente significative n'ait

été observée que dans le deuxième bloc. De plus, il semble nécessaire de considérer ces résultats avec la même prudence que pour l'analyse en quatre sous-blocs. La division des données n'ayant pas été planifiée dans la tâche comparative, le nombre de temps de réponse pour chaque Main × Position × Bloc n'était pas parfaitement équilibré. Même si suffisamment de données étaient disponibles pour détecter une spatialisation, des différences dans le poids des d_{TR} peuvent toujours générer des pentes de régression moins fiables que lorsque le même nombre de données est collecté dans chaque cellule du plan expérimental. La question demeure donc de savoir si l'installation progressive du SPoARC au cours d'une tâche utilisant des séquences nouvelles à chaque nouvel essai pourrait être répliquée dans de futures études offrant un meilleur équilibrage des temps de réponse dans chaque condition.

En définitive, cette huitième étude a permis de préciser le lien entre spatialisation et apprentissage sériel chez l'adulte, en montrant que les associations spatio-positionnelles jouent un rôle uniquement transitoire dans le traitement de l'ordre en mémoire. Par ailleurs, nos résultats suggèrent également que la spatialisation pourrait contribuer à une meilleure stabilisation de la trace mnésique chez cette population : dans cette huitième étude, une plus grande spatialisation – qui plus est, spécifiquement orientée de gauche à droite – était associée à des courbes d'apprentissage plus marquées (modélisées par le déclin des temps de réponse au fil des essais). Bien que ce lien n'ait pas été généralisable à un meilleur rappel différé (concernant pour rappel les mesures effectuées lors du test de rappel à long terme), un tel résultat soutient d'autant plus l'hypothèse d'un mécanisme fonctionnel, favorisant non seulement le maintien temporaire de l'information en mémoire de travail, mais pouvant également exercer un rôle notable pour la consolidation mnésique (une idée que nous développons plus amplement dans la Discussion Intermédiaire de ce chapitre). Dans la continuité de cette étude, les Expériences 9 et 10 tenteront de répliquer ces résultats en examinant l'évolution du SPoARC au fil de la consolidation chez l'enfant. L'Expérience 9 offrira une comparaison directe avec les données de cette huitième étude en proposant un encodage répétitif de séquences de quatre items, tandis que l'Expérience 10 s'attachera à examiner la variation de la spatialisation dans le cadre de séquences minimales de deux items, particulièrement susceptibles d'être groupées en une seule unité durant la mémorisation.

4.3 Expérience 9

4.3.1 Objectif

Cette neuvième étude visait à examiner la consolidation du SPoARC chez l'enfant d'âge scolaire par le biais du protocole fondé sur des mesures répétées développé chez l'adulte dans l'Expérience 8. Pour permettre une mise en parallèle directe avec les résultats obtenus précédemment, le choix a été fait d'examiner l'effet chez une population que nous savons capable de spatialiser l'information en mémoire de travail. Cette neuvième étude a donc été réalisée auprès d'enfants scolarisés en dernière année d'école élémentaire, une population que nous considérons comme la plus favorable à l'étude de l'effet parmi les trois groupes d'âge en élémentaire étudiés jusqu'à présent. Toujours dans le but de maintenir une continuité avec l'Expérience 8, cette neuvième étude impliquait la mémorisation répétée d'une série de quatre items, une longueur de séquence pour laquelle une spatialisation avait pu être détectée en CM2 dans le précédent chapitre.

Parce que le SPoARC s'est avéré uniquement transitoire dans l'Expérience 8, nous émettons l'hypothèse que la présentation d'une information répétée lors d'une tâche de spatialisation devrait également conduire à l'extinction de l'effet chez un public plus jeune. La raison est que l'utilisation de marqueurs spatiaux pour coder l'ordre des items mémorisés ne serait plus d'utilité pour le système cognitif une fois la séquence groupée en une seule unité en mémoire. Rappelons également que le premier stade de l'apprentissage sériel était caractérisé par un SPoARC significatif chez l'adulte, un résultat que nous attribuons à un renforcement temporaire du lien entre les items et leurs marqueurs spatiaux sur la ligne mentale. Cette neuvième étude permettra d'examiner si un tel renforcement est également visible chez l'enfant, un résultat qui pourrait s'avérer propice à développer une méthode optimale de détection de l'effet pour cette population. Pour reprendre nos hypothèses issues de l'introduction de ce chapitre, la présentation d'informations dont l'ordre varie d'un essai à l'autre implique une mise à jour constante et flexible de la représentation spatiale de chaque séquence mémorisée (par exemple, d'un essai à l'autre, l'item kiwi est présenté en position 1 à tel essai, impliquant un marqueur gauche, pour être ensuite présenté en position 3 à un autre essai, impliquant un marqueur droit). Par ailleurs, la coordonnée spatiale assignée à un item à un essai n peut exercer une interférence proactive lorsque ce même item est de nouveau rencontré à l'essai $n + x$ (en témoigne par exemple les erreurs de protrusions retrouvées dans les tâches de rappel sériel Conrad, 1960 ; Henson, 1996, 1999). La réallocation constante de marqueurs spatiaux différents à des informations déjà encodées précédemment pourrait donc s'avérer plus difficilement mobilisable chez une population plus jeune, expliquant éventuellement le manque de robustesse ou la non-détection de l'effet. Par contraste, la

répétition d'une même séquence pourrait favoriser l'élaboration d'une représentation spatiale plus stable des items (ces derniers étant toujours associé au même marqueur spatial d'un essai à l'autre), et ainsi augmenter la saillance de l'effet de spatialisation avant que l'intégralité de la séquence ne soit groupée en une seule unité en mémoire.

En résumé, une trajectoire similaire à celle déjà observée chez l'adulte est anticipée pour cette neuvième étude : la répétition d'une même information sérielle devrait permettre un renforcement temporaire des associations entre les items et leurs marqueurs spatiaux en mémoire, suivi d'une disparition du SPoARC une fois la séquence consolidée en un seul chunk. Au même titre que l'Expérience 8, une réanalyse de données non-répétées (issues de l'Expérience 6) tentera de comparer la variation du SPoARC chez l'enfant lorsque des informations nouvelles sont codées d'un essai à l'autre. En dernier lieu, cette neuvième étude tentera de dresser un lien entre spatialisation et apprentissage répété chez l'enfant, en répliquant les analyses exploratoires effectuées dans la précédente expérience. De telles analyses permettront de déterminer si un apprentissage plus marqué tend à être associé à une plus forte spatialisation en mémoire, une relation ayant déjà pu être esquissée chez l'adulte dans l'Expérience 8.

4.3.2 Méthode

4.3.2.1 Participants

Cette neuvième étude a été réalisée auprès d'un échantillon de 37 participants scolarisés en classe de CM2 (âge moyen = 10.9 ans, $ET = 0.3$). Tous les participants présentaient une vision normale ou corrigée, et aucun ne présentait de trouble moteur, cognitif ou psychique connu. L'échantillon était composé de 17 filles et 20 garçons, pour un total de 33 droitiers, deux gauchers et deux ambidextres. Sur l'ensemble des participants, 31 étaient de langue maternelle française. Les participants restants étaient respectivement de langue maternelle anglaise, arabe, cantonaise, italienne, moldave et tchétchène ; et parlaient tous couramment le français. Les participants ont été recrutés auprès de deux établissements publics de la ville de Nice et ont été rencontrés entre le deuxième et le troisième trimestre de l'année scolaire.

4.3.2.2 Matériel

Le programme PsychoPy implémenté dans l'Expérience 7 a été réutilisé dans le cadre de cette neuvième étude. Ce programme plus ludique a été préféré à celui utilisé dans l'Expérience 6 pour faciliter l'engagement des participants face à une tâche particulièrement répétitive. Les stimuli utilisés pour la tâche de spatialisation consistaient en huit images de fruits (banane, cerise, citron, framboise, kiwi, orange, pastèque et

raisin). En complément de ces stimuli, une liste de huit images d'animaux (cheval, cochon, fourmi, girafe, mouton, oiseau, poisson et tortue) a été utilisée pour les quatre essais d'entraînement complétés en amont de chaque session expérimentale.

L'élaboration des séquences de cette neuvième étude a suivi la même logique que celle de l'Expérience 8 : pour chaque participant, deux séquences uniques ont été élaborées et assignées à l'une ou l'autre des deux sessions expérimentales, lors desquelles le participant répondait selon une assignation réponse/main donnée inversée entre la première et la seconde session. Chaque session impliquait 32 essais, dont la moitié correspondaient à des essais positifs (impliquant la reconnaissance d'items cibles), et l'autre moitié à des leurres. Deux blocs de 16 essais chacun ont été conçus de manière à contenir un nombre égal d'items cibles et d'items leurres. La liste des stimuli étant composée de huit fruits au lieu de dix pour l'Expérience 8, la répartition des items leurres a été implémentée comme suit : lorsque la séquence [1-2-3-4] était mémorisée lors de la première session, les items 5, 6, 7 et 8 étaient présentés comme leurres lors de la phase de reconnaissance, et inversement lorsque la séquence [5-6-7-8] était mémorisée lors de la seconde session. Concernant les items cibles, chaque position sérielle a été testée deux fois par bloc, pour un total de quatre tests par position dans chaque session expérimentale.

4.3.2.3 Procédure

Tâche de spatialisation Les passations ont été réalisées dans une salle calme à l'abri de toute distraction. Le participant était placé à environ 50 cm de l'écran, et l'expérimentateur faisait usage d'un écran annexe pour veiller au bon déroulement de la tâche. La première session expérimentale débutait par un entraînement, lors duquel l'enfant effectuait d'abord la lecture des consignes à haute voix. De la même manière que chez l'adulte, ces consignes informaient le participant qu'une seule série serait répétée en vue d'une mémorisation durant la tâche. À l'issue de l'entraînement, l'expérimentateur demandait au participant de dénommer l'ensemble des fruits qui seraient présentés par la suite. S'ensuivait une phase expérimentale, lors de laquelle une seule série de fruits était présentée durant 32 essais (chacun étant composé d'une phase de mémorisation et d'une phase de reconnaissance). Des feedbacks différents étaient donnés aux participants en cas de réponse correcte, incorrecte ou pour une absence de réponse dans les 3500 ms imparties. Chaque essai était manuellement lancé par l'expérimentateur, qui veillait au maintien de la concentration du participant. Dans l'idéal, les deux sessions expérimentales étaient réparties sur deux jours consécutifs et à des horaires similaires. Lorsque les conditions de passation ne permettaient pas un tel équilibre, l'expérimentateur s'assurait que deux sessions soient séparées d'a minima quelques heures.

Tâche de rétention à long terme Un mois après la tâche de spatialisation, les enfants ont de nouveau été rencontrés au sein des établissements afin d'exécuter une tâche de rappel à long terme. Un rappel libre a tout d'abord été proposé, le participant devant reconstruire chaque séquence mémorisée en énumérant le plus de fruits possible, tout en tentant de placer les items dans le bon ordre. Pour chaque séquence, l'expérimentateur notait le nombre d'items rappelés à la bonne position (score lié à l'ordre), ainsi que le nombre d'items correctement rappelés indépendamment de leur position (score lié à l'item). Quelle que soit la performance à cette tâche de rappel libre, le participant effectuait ensuite une tâche de rappel indicé. Lors de cet exercice, quatre séquences étaient énoncées par l'expérimentateur. Parmi ces séquences se trouvaient les deux séquences cibles mémorisées par le participant, ainsi que deux séquences leurres qui n'avaient jamais été rencontrées lors de la tâche (i.e., comprenant les huit fruits possibles, placés dans un ordre aléatoire). L'ordre dans lequel les séquences cibles et les séquences leurres étaient énoncées était contrebalancé entre les participants, selon les mêmes permutations que celles utilisées chez l'adulte (voir le Tableau D.1 en Annexe D). Pour chaque séquence énoncée, le participant devait indiquer s'il pensait reconnaître une des deux séries mémorisées durant la tâche, en donnant un pourcentage de certitude quant à sa réponse. Une fois les quatre séries présentées, le participant pouvait modifier ses réponses s'il le souhaitait, notamment s'il avait identifié plus de deux séries comme étant des séries cibles. Les premières et dernières réponses des participants ont toutes deux été retenues par l'expérimentateur. Sur les 37 participants de cette étude, 34 enfants ont pu être rencontrés de nouveau pour effectuer la tâche de rappel différé.

4.3.3 Résultats

4.3.3.1 Analyses préliminaires

Taux de réussite Sur l'ensemble de la tâche, les participants ont atteint un taux de réussite égal à .96 (ET = .03, min = .89, max = 1). L'analyse exécutée sur chaque bloc a montré que de meilleures performances ont été atteintes dans la deuxième partie de la tâche comparée à la première, témoignant d'une amélioration de la précision des réponses au fil des répétitions (m_{B1} = .95, ET = .04, m_{B2} = .97, ET = .03, $t(36) = -2.05, p = .047$, d de Cohen = 0.34).

Rétention à long terme Les résultats du rappel libre effectué un mois après la tâche de spatialisation ont montré que les enfants ont éprouvé des difficultés à se remémorer les deux séries mémorisées lors de la passation. Le Tableau 4.3 rend compte des proportions de participants ayant spontanément rappelé soit zéro, un, deux, trois

ou quatre items pour chaque séquence, en distinguant les scores tenant compte de la position des items et les scores calculés indépendamment de la position. Concernant le rappel indicé, peu d'enfants sont parvenus à identifier les deux séries encodées lors de la tâche : seul 15% des participants ont réussi à reconnaître les deux séries cibles, tandis que 70% des enfants ont correctement identifié au moins l'une des deux séquences mémorisées. Les 15% restants ne sont pas parvenus à distinguer aucune des séries cibles[7].

Tableau 4.3 – Rappel libre : effectif et proportions de participants ayant rappelé entre zéro et quatre éléments indépendamment de leur position (Item) et à leur bonne position (Ordre) pour chacune des deux séquences mémorisées dans l'Expérience 9

	Item		Ordre	
	Séquence 1	Séquence 2	Séquence 1	Séquence 2
0 item	1 (3%)	2 (6%)	27 (62%)	23 (68%)
1 item	8 (23.5%)	7 (21%)	7 (21%)	10 (29%)
2 items	16 (47%)	15 (44%)	6 (17%)	1 (3%)
3 items	8 (23.5%)	10 (29%)	0 (0%)	0 (0%)
4 items	1 (3%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)

Note. Séquences 1 *vs.* 2 font respectivement référence aux séquences présentées lors de la première et deuxième session expérimentale.

Régression des temps de réponse en fonction du numéro d'essai De la même manière que chez l'adulte, une analyse de régression des temps de réponse en fonction du numéro d'essai a été exécutée pour rendre compte de l'apprentissage de la séquence répétée. Les temps de réponse obtenus pour l'ensemble des items (cibles et leurres) ont été winsorisés, résultant en la transformation de 4% des données. Une première analyse de régression a été réalisée pour chaque séquence séparément. Les résultats ont montré une diminution significative des temps de réponse au fil des essais à la fois pour la première et pour la deuxième série mémorisée ($\beta = -3.5$, $t(1137.0016) = -4.04$, $p < .001$, $Std.\beta = -0.09$ pour la séquence 1 et $\beta = -2.5$, $t(1126.0428) = -3.01$, $p = .003$, $Std.\beta = -0.07$ pour la séquence 2, voir la Figure D.5 en Annexe D). Cette régression des temps de réponse était particulièrement visible dans le premier bloc (toute session confondue), la pente de régression calculée ayant atteint le seuil de significativité pour cette condition expérimentale uniquement ($\beta = -5.5$, $t(1132.032) = -3.19$, $p = .002$, $Std.\beta = -0.07$ pour le premier bloc ; contre $\beta = -2$, $t(1131.018) = -1.29$, $p = .198$, $Std.\beta = -0.03$ pour le deuxième bloc)[8].

[7] Ces données correspondent aux réponses finales données par les participants.

[8] Des modèles de régression logistique effectués sur la précision des réponses (codée 1 en cas de réponse correcte contre 0 en cas de réponse incorrecte) ont également montré une progression marginale sur l'ensemble des essais lorsque les participants étaient confrontés à la première séquence ($\beta = 0.04$,

Temps de réponse Les temps de réponse bruts collectés uniquement lors des essais positifs (i.e., des essais lors desquels des items présents dans la séquence devaient être identifiés) ont ensuite été winsorisés séparément, résultant en la transformation de 4.3% des données. Le temps de réponse moyen sur l'ensemble de la tâche était égal à 983 ms (ET = 369 ms). Le temps de réponse obtenu pour le Bloc 1 était de 993 ms (ET = 370 ms), tandis que des temps de réponse plus courts ont été observés pour le Bloc 2 (973 ms en moyenne, ET = 366 ms). Une corrélation entre taux de réussite et temps de réponse n'a pas indiqué que les participants tendaient à privilégier la vitesse au détriment de l'exactitude pendant la tâche ($\rho = -.16$, $p = .358$, $N = 37$).

4.3.3.2 Effet de spatialisation : Modèles mixtes linéaires généralisés

Les mêmes modèles linéaires mixtes généralisés que ceux implémentés dans l'Expérience 8 ont été testés afin d'évaluer la présence du SPoARC au fil de la tâche (voir le Tableau D.8 en Annexe D pour une description des modèles). La distribution des temps de réponse présentant une asymétrie positive (voir la Figure D.1 en Annexe D), une distribution Gamma a été utilisée comme référence dans ces modèles mixtes. Le classement d'AIC (reporté dans le Tableau D.9 en Annexe D) a identifié le modèle $M1_R$ comme étant le plus parcimonieux, lequel rendait uniquement compte des effets aléatoires des facteurs Sujet et Item. Les modèles pertinents pour cette étude (i.e., le modèle $M5_R$, rendant compte de l'interaction Main × Position ; et le modèle $M8_R$ rendant compte de l'interaction Main × Position × Bloc) étaient respectivement classés troisième et dernier, sans qu'ils ne diffèrent significativement du modèle classé premier ($\chi^2(4) = 5.52$, $p = .238$ pour le modèle $M5_R$ et $\chi^2(7) = 8.28$, $p = .308$ pour le modèle $M8_R$).

Une analyse détaillée du modèle $M8_R$ a été réalisée à titre exploratoire. Aucun résultat indiquant la présence d'effet SPoARC ou d'une éventuelle variation de l'effet entre les blocs n'a pu être observé ($t(1112) = -0.84$, $p = .402$, $Std.\beta = -12.87$ pour l'interaction Position × Main ; $t(1112) = -0.53$, $p = .599$, $Std.\beta = -1.52$ pour l'interaction Position × Main × Bloc, voir le Tableau D.10 en Annexe D pour l'ensemble des statistiques relatives à ce modèle). Les temps de réponse moyens obtenus pour chaque position et chaque main de réponse sur l'ensemble de la tâche et pour chaque bloc séparément sont présentés dans le Tableau D.11 en Annexe D.

$z = 1.74$, $p = .083$, $\beta Std. = 0.38$), ainsi qu'une augmentation significative de la performance pour la deuxième séquence ($\beta = 0.03$, $z = 2.00$, $p = .045$, $\beta Std. = 0.33$). Une telle progression ne s'est par ailleurs pas révélée particulièrement spécifique ni à la première ni à la deuxième partie de la tâche, dans la mesure où les modèles exécutés sur le Bloc 1 et sur le Bloc 2 n'ont pas atteint le seuil de significativité ($\beta = 0.03$, $z = 0.89$, $p = .372$, $\beta Std. = 0.14$ et $\beta = 0.07$, $z = 1.51$, $p = .130$, $\beta Std. = 0.32$ respectivement)

4.3.3.3 Effet de spatialisation par régression linéaire

L'absence d'effet SPoARC a davantage été investiguée dans une analyse de régression effectuée sur la différence des temps de réponse entre main gauche et main droite (d_{TR}). Sur l'ensemble de la tâche, les d_{TR} se sont avérés diminuer en moyenne de 19 ms, sans que le coefficient de la pente ne s'éloigne significativement de zéro (d_{TR-P1} = 52 ms, ET = 260 ms, d_{TR-P2} = 8 ms, ET = 221 ms, d_{TR-P3} = 24 ms, ET = 267 ms, d_{TR-P4} = −15 ms, ET = 287 ms ; $t(109.42) = -1.22$, $p = .224$, $Std.\beta = -0.08$). Des pentes ont également été calculées pour la première et la deuxième partie de la tâche, ne révélant aucun effet SPoARC dans le premier bloc. En effet, la pente calculée sur l'ensemble des positions n'a pas atteint le seuil de significativité (d_{TR-P1} = 53 ms, ET = 268 ms, d_{TR-P2} = −7 ms, ET = 325 ms, d_{TR-P3} = 67 ms, ET = 356 ms, d_{TR-P4} = 4 ms, ET = 417 ms ; $\beta = -7$, $t(105.821) = -0.30$, $p = .763$, $Std.\beta = -0.02$), de même que la pente calculée sur les positions extrêmes ($\beta = -53$, $t(31.04) = -0.92$, $p = .367$, $Std.\beta = -0.08$), ou encore pour les tests exécutés pour chaque position (tous les $|t| \leq 1.16$, tous les $p \geq 0.253$, tous les $|d|$ de Cohen ≤ 0.20). L'effet SPoARC n'a pas non plus été observé pendant le second bloc, que ce soit lors de l'analyse de régression globale (d_{TR-P1} = 58 ms, ET = 345 ms, d_{TR-P2} = 21 ms, ET = 295 ms, d_{TR-P3} = −28 ms, ET = 335 ms, d_{TR-P4} = -13 ms, ET = 445 ms ; $\beta = -27$, $t(107.53) = -1.15$, $p = .251$, $Std.\beta = -0.08$), lors de l'analyse de régression restreinte aux premières et dernières positions ($\beta = -71$, $t(71) = -0.77$, $p = .446$, $Std.\beta = -0.09$), ou encore lors des tests t exécutés pour chaque d_{TR} séparément (tous les $|t| \leq 1.03$, tous les $p \geq 0.311$, tous les $|d|$ de Cohen ≤ 0.17). La Figure 4.6 illustre à titre informatif les pentes observées dans chaque bloc.

4.3.3.4 Analyse exploratoire : découpage par sous-blocs

En accord avec nos hypothèses, aucun SPoARC n'a été détecté dans durant le second bloc de l'apprentissage d'une séquence, suggérant que la consolidation de l'information a conduit à la disparition de la spatialisation. Cependant, là où un SPoARC significatif a pu être détecté en début de tâche pour notre échantillon adulte, un tel résultat ne s'est pas avéré réplicable chez l'enfant. Pour mieux affiner ce résultat, et parce qu'un SPoARC particulièrement saillant avait pu être détecté par le biais d'une segmentation plus fine des données dans l'Expérience 8, une analyse en quatre sous-blocs a également été réalisée pour les données répétées de cette neuvième étude. Une diminution des temps de réponse en fonction du numéro d'essai a été investiguée au préalable dans chacun des quatre sous-blocs, révélant des résultats significatifs pour le premier et pour le deuxième quart de la tâche ($\beta = -13$, $t(549.985) = -2.63$, $p = .009$, $Std.\beta = -0.09$ et $\beta = -10.5$, $t(544.160) = -2.14$, $p = .033$, $Std.\beta = -0.07$

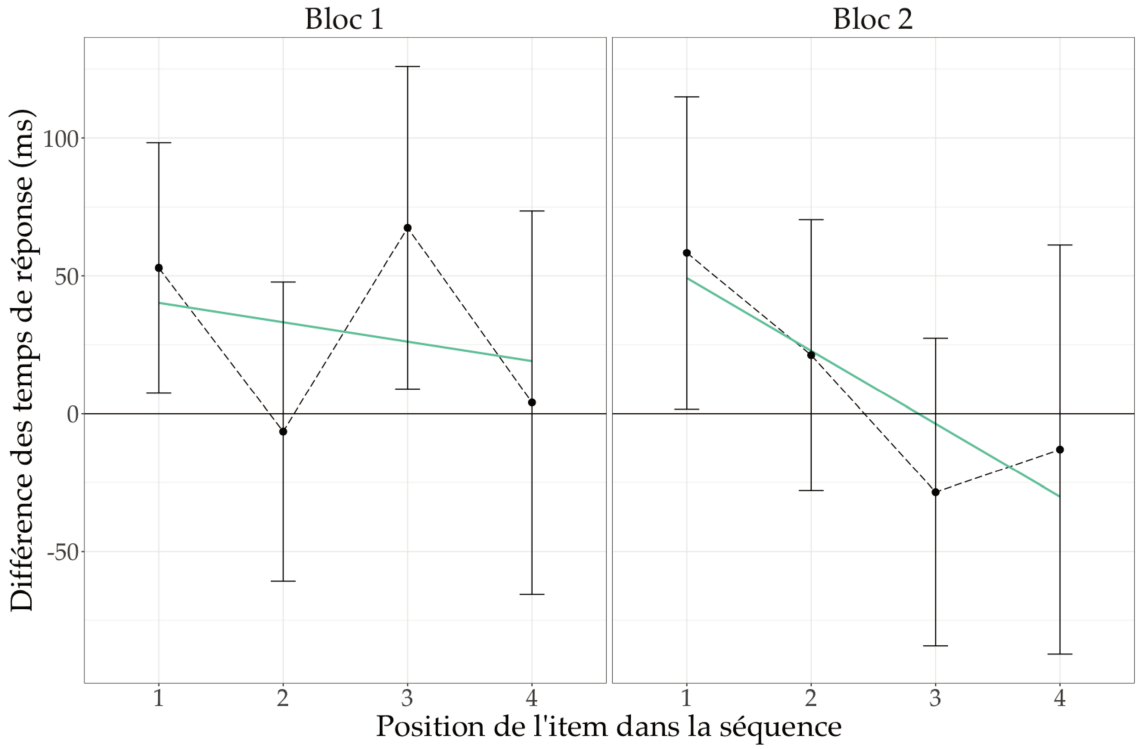


Figure 4.6 – Régression linéaire de la différence des temps de réponse moyens (d_{TR}) entre main droite et main gauche en fonction de la position de l'item et du bloc pour les données répétées de l'Expérience 9. *Note.* La séparation entre les deux blocs est intervenue à mi-parcours de chaque session expérimentale, à l'insu des participants. La figure a été réalisée sur les données agrégées par position, par sujet et par session expérimentale, et les barres d'erreur correspondent à ± 1 Erreur Standard.

respectivement). Alors que le troisième sous-bloc n'était pas caractérisé par une diminution significative des temps de réaction ($\beta = -3$, $t(546.077) = -0.62$, $p = .536$, $Std.\beta = -0.02$), une diminution des temps de réponse s'est avérée de nouveau détectable dans la dernière partie de la tâche ($\beta = -10.29$, $t(546.939) = -2.03$, $p = .043$, $Std.\beta = -0.07$), indiquant que la stabilisation des temps de réponse n'a pas été atteinte à l'issue des 32 répétitions de la séquence.

Modèles linéaires mixtes généralisés Les modèles mixtes implémentés précédemment ont été de nouveau exécutés en remplaçant le facteur Deux-blocs par le facteur Quatre-sous-blocs (voir le Tableau D.8 en Annexe D pour un détail des modèles). Le classement des différents modèles n'a pas différé de la première analyse, le modèle classé premier demeurant le modèle $M1_{SB}$. Les modèles rendant compte d'un effet SPoARC ($M5_{SB}$) ou d'une variation du SPoARC en fonction du numéro de sous-bloc ($M8_{SB}$) ont été classés respectivement troisième et dernier, sans que ces derniers ne diffèrent significativement du premier modèle ($\chi^2(4) = 5.95$, $p = .203$, pour le modèle $M5_{SB}$ et $\chi^2(7) = 8.96$, $p = .26$ pour le modèle $M8_{SB}$). De plus, l'analyse détaillée du modèle $M8_{SB}$ réalisée à titre exploratoire n'a pas permis de capturer des effets significatifs, que ce soit concernant l'interaction Main × Position caractéristique du SPoARC ($\beta = 1.16$, $ES = 9.42$, $t(1112) = .12$, $p = .902$, $Std.\beta = -12.95$), ou concernant l'interaction Main × Position × Sous-bloc ($\beta = -5.11$, $ES = 3.68$, $t(1112) = -1.39$, $p = .165$, $Std.\beta = -6.30$). Le Tableau D.12 en Annexe D reporte les temps de réponse moyens obtenus pour chaque main et chaque position dans les quatre sous-blocs.

Régression linéaire En accord avec l'analyse précédente, l'examen du SPoARC par une analyse des différences de temps de réponse n'a pas non plus conduit à des résultats significatifs sur les données segmentées en sous-blocs. Comme reporté dans le Tableau D.13 en Annexe D, aucune pente de spatialisation ne s'est avérée différente de zéro, que ce soit en considérant l'ensemble des positions ou en cantonnant l'analyse aux positions extrêmes. De même, aucune d_{TR} moyenne n'a différé significativement d'une moyenne théorique nulle. La Figure D.7 en Annexe D rend compte des pentes obtenues pour chaque sous-bloc.

4.3.3.5 Comparaison avec des données non-répétées

Les données collectées en condition L4 chez les élèves de CM2 de l'Expérience 6 ont été réanalysées dans le cadre de cette étude pour comparer la variation du SPoARC lors de la mémorisation de séquences nouvelles, comme effectué chez l'adulte dans l'Expérience 8. Les modèles de régression linéaire ont indiqué la présence d'un SPoARC

significatif en considérant l'ensemble des données, comme relevé dans le chapitre précédent ($d_{TR-P1} = 22$ ms, $ET = 368$ ms, $d_{TR-P2} = -31$ ms, $ET = 387$ ms, $d_{TR-P3} = 21$ ms, $ET = 477$ ms, $d_{TR-P4} = -142$ ms, $ET = 449$ ms ; $t(108.80) = -2.18$, $p = .032$, $Std.\beta = -0.13$). Par ailleurs, une différence dans la manifestation du SPoARC a pu être relevée dans l'analyse par bloc. Dans la première partie de la tâche (Essais 1 à 16), une pente de spatialisation significative a pu être observée, les d_{TR} diminuant en moyenne de 104 ms pour chaque position ($d_{TR-P1} = 92$ ms, $ET = 425$ ms, $d_{TR-P2} = -49$ ms, $ET = 372$ ms, $d_{TR-P3} = -128$ ms, $ET = 651$ ms, $d_{TR-P4} = -223$ ms, $ET = 580$ ms ; $\beta = -104$, $t(84.70) = -3.42$, $p < .001$, $Std.\beta = -0.22$). En revanche, le SPoARC ne s'est pas avéré détectable dans la seconde moitié de la tâche (Essais 17 à 32), que ce soit en calculant la pente sur l'ensemble des positions ($d_{TR-P1} = -41$ ms, $ET = 571$ ms, $d_{TR-P2} = -22$ ms, $ET = 618$ ms, $d_{TR-P3} = 130$ ms, $ET = 612$ ms, $d_{TR-P4} = -136$ ms, $ET = 537$ ms ; $\beta = -19$, $t(90.04) = -0.48$, $p = .633$, $Std.\beta = -0.03$), en exécutant la régression uniquement en tenant compte des deux positions les plus extrêmes ($\beta = -94$, $t(29.76) = -0.70$, $p = .488$, $Std.\beta = -0.09$), ou encore en opposant chaque d_{TR} moyen contre une moyenne théorique de zéro (tous les $|t| \leq 1.38$, tous les $p \geq .175$, tous les $|d|$ de Cohen ≤ 0.25). L'analyse détaillée des données non-répétées est disponible en Annexe D (voir l'Analyse D.2). De même que pour l'Expérience 8, l'analyse par sous-bloc n'a pas été exécutée pour ces données comparatives, le nombre de données par position et par sujet présentant par ailleurs un trop fort déséquilibre entre les différents sous-blocs.

4.3.3.6 Spatialisation et apprentissage

Malgré l'absence d'un SPoARC à l'échelle du groupe dans la première partie de la tâche répétée, l'examen du lien entre spatialisation et apprentissage a tout de même été effectué dans cette neuvième étude. Aucune des analyses exécutées n'a permis de mettre en évidence un lien significatif entre l'effet SPoARC et les capacités d'apprentissage des participants, que ce soit en considérant les performances à la tâche de spatialisation, ou les performances liées au rappel différé réalisé un mois après l'expérience. Le détail de ces analyses est fourni en Annexe D (voir l'Analyse D.3).

4.3.4 Discussion

Cette neuvième étude s'est attachée à examiner la consolidation du SPoARC chez l'enfant de dix ans lorsqu'une unique séquence de quatre items devait être mémorisée. L'Expérience 8 avait permis d'observer que le SPoARC tendait à disparaître à mesure de la consolidation chez des participants adultes. À partir de ces résultats, nous anticipions qu'une trajectoire similaire opérerait chez l'enfant : la spatialisation

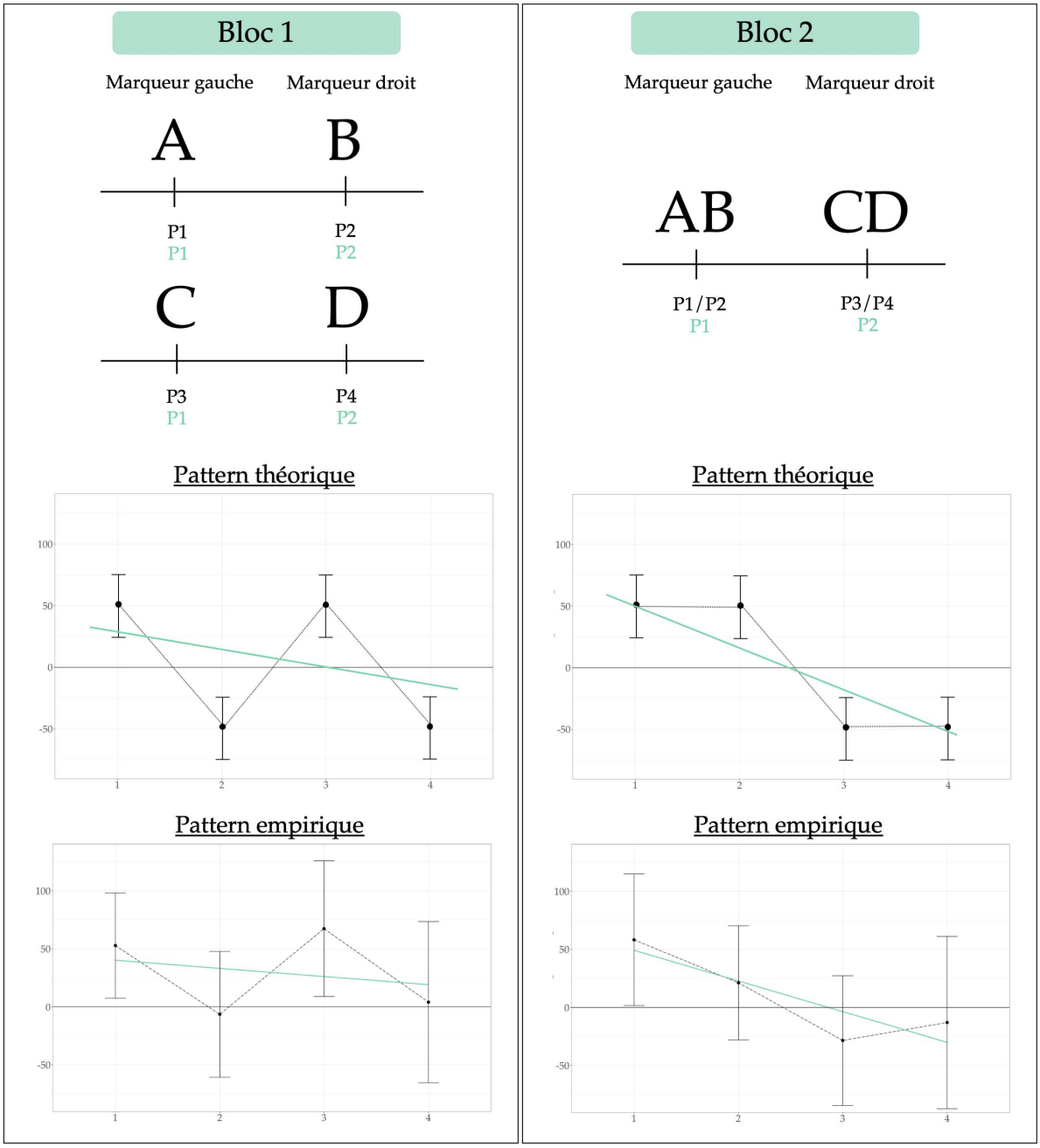
individuelle des items laisserait progressivement place à un codage spatial plus global, l'intégralité de la séquence pouvant être représentée grâce à un seul marqueur positionnel une fois la série chunkée en mémoire à long terme. Néanmoins, parce que le traitement d'une série répétée pourrait participer à un renforcement progressif des associations spatio-positionnelles au premier stade de l'apprentissage, nous pensions également qu'un SPoARC serait préférentiellement observé au cours de la première partie de la tâche. Les résultats de cette neuvième étude n'ont pas permis de corroborer l'ensemble de ces hypothèses, dans la mesure où aucun SPoARC significatif n'a pu être observé en début d'apprentissage, que ce soit en segmentant nos données en deux blocs de 16 essais, ou en effectuant une segmentation plus fine en quatre sous-blocs à titre exploratoire.

L'absence d'un SPoARC en première partie de tâche chez l'enfant pourrait résulter d'une consolidation d'un chunk plus rapide que chez l'adulte, et quasi instantanée (i.e., au cours des huit premières répétitions). Autrement dit, la séquence mémorisée par les participants dans cette neuvième étude aurait pu être trop rapidement intégrée en mémoire à long terme sous la forme d'un unique chunk, ne permettant pas d'observer une spatialisation en début d'apprentissage. Une telle interprétation peut sembler plausible, dans la mesure où les capacités d'apprentissage sont usuellement considérées comme étant plus efficientes chez l'enfant que chez l'adulte, par exemple dans l'apprentissage de séquences motrices ou dans l'acquisition du langage. Une étude de Smalle et al. (2017) a en effet montré que des enfants de neuf ans tendaient à apprendre dans une fenêtre temporelle plus courte que les adultes. Dans une étude utilisant le paradigme de répétition de Hebb, Smalle et al. (2018) ont comparé les capacités d'apprentissage de séries répétées entre enfants et adultes. Leurs résultats ont montré une meilleure consolidation chez les enfants dans une condition d'apprentissage implicite. Cette différence de consolidation s'est avérée moindre pour des séquences dont la répétition était explicite, une condition qui correspond plus étroitement au protocole développé dans ce chapitre. Nos analyses concordent avec celle de ces auteurs puisqu'une stabilisation des temps de réponse n'était toujours pas atteinte dans le quatrième quart de la tâche chez l'enfant, tandis qu'elle était visible dès le deuxième quart chez l'adulte. De plus, des performances de rappel différé de nos participants enfant se sont révélées faibles (e.g., seuls 15% des enfants ont réussi à identifier les deux séries mémorisées). Nos résultats tendent donc à fragiliser l'hypothèse d'un apprentissage particulièrement efficient chez l'enfant.

Il s'avère qu'un facteur plus décisif pourrait distinguer enfants et adultes dans leur manière de consolider une séquence répétée. Un ensemble de travaux suggère en effet que ces deux populations tendent à présenter des approches différentes dans la manière de segmenter l'information en mémoire. Une telle idée est par exemple développée par Newport (1990) et Elman (1993), qui évoquent le principe du *less is more* pour

expliquer qu'une séquence (par exemple ABCDEFGH) tend à être segmentée en unités plus nombreuses et plus petites chez l'enfant lors de l'apprentissage (AB-CD-EF-GH), là où l'adulte tend à construire des plus grands chunks (ABCD-EFGH, voir aussi Jones, 2012). De telles différences entre enfants et adultes ayant également été empiriquement observées par Smalle et al. (2016) lors d'une tâche de répétition de Hebb, il peut donc être permis d'avancer que nos plus jeunes participants ont codé les séquences répétées en deux unités distinctes au lieu d'une seule chez les adultes.

Par ailleurs, de telles divergences pourraient s'avérer déterminantes dans les patterns de spatialisation associés à ces deux types de segmentation, comme présenté dans la Figure 4.7. La partie gauche de cette figure illustre les patterns de spatialisation au début de l'apprentissage lorsqu'une séquence de quatre items [ABCD] est progressivement divisée en deux sous-ensembles distincts ([AB] *vs.* [CD]). En admettant que les quatre items de la séquence soient effectivement spatialisés durant les premières répétitions, coder l'intégralité des items sur une même ligne mentale pourrait être source d'interférence spatiale entre les marqueurs associés aux positions *absolues* des éléments (l'item C étant le troisième item de la série [ABCD], ce qui impliquerait l'assignation d'un marqueur droit), et ceux associés à la position *relative* des items au sein des chunks (l'item C étant également le premier élément du chunk [CD], ce qui impliquerait plutôt un marqueur gauche). Pour contourner le problème, il peut être envisagé que ces deux sous-ensembles aient pu être codés séparément en sollicitant deux dimensions sur le tableau mental. Une telle organisation pourrait s'avérer plausible, dans la mesure où le SPoARC est connu pour se manifester sur un continuum horizontal, mais également sur le plan vertical (la spatialisation en mémoire de travail opérant du haut vers le bas sur ce continuum, voir Hartmann et al., 2021). Sous réserve que le continuum vertical puisse être recruté chez l'enfant pour coder l'ordre dans l'espace (un SPoARC vertical n'ayant jamais été directement testé chez l'enfant à notre connaissance), la Figure 4.7a illustre un tel double codage, en montrant sur la première ligne les items du chunk [AB] respectivement associés à la gauche et à la droite de l'espace mental, et les items du chunk [CD], codés de la même manière mais sur une ligne inférieure. Sous cette représentation mentale, l'item C serait alors codé en accord avec sa position relative au sein du chunk (en étant assigné à gauche de l'espace mental), tout en conservant un codage cohérent avec sa position absolue (en étant représenté plus bas que les items A et B, qui le précèdent dans la série [ABCD]). En raison d'un renforcement temporaire des associations entre les items et de leurs marqueurs spatiaux en début d'apprentissage, l'on observerait alors des différences de temps de réponse positives à la fois pour les items A et C (la main gauche répondant plus rapidement pour ces deux items du fait du marqueur gauche associé), ainsi que des différences de temps de réponse négatives pour les items B et D (la main droite répondant plus rapidement pour ces deux items). La Figure 4.7a illustre les résultats comportementaux attendus sous cette hypothèse.



(A) (B)

FIGURE 4.7 – Représentations spatiales et patterns comportementaux associés au premier stade (A) et au deuxième stade (B) de l'apprentissage d'une série segmentée en deux petits chunks. *Note.* Les positions en noir correspondent aux positions absolues des items au sein de la série non segmentée, tandis que les positions en vert indiquent les positions intra-chunk (Bloc 1) ou inter-chunk (Bloc 2).

À l'analyse visuelle de nos données, il s'avère que les patterns de réponses obtenus pour le premier bloc présentent une certaine similarité avec ces patterns théoriques : tandis qu'un avantage de la main gauche semble visible pour les items en première et en troisième position, cet avantage s'avère moins saillant pour les items en deuxième

et quatrième position, bien que les différences de temps de réponse pour ces deux items restent proches de zéro (voir la Figure 4.7a). Par ailleurs, ces valeurs s'avèrent effectivement négatives en considérant les données agrégées sur les positions finales des deux chunks hypothétiques ($d_{TR-\mathrm{P2/P4}} = -22$ ms, $ET = 314$ ms *vs.* $d_{TR-\mathrm{P1/P3}} = 57$ ms, $ET = 272$ ms). En tenant compte de ces données agrégées, une pente de spatialisation marginalement significative a pu être observée, les différences de temps de réponse régressant en moyenne de -79 ms entre les positions P1/P3 et P2/P4 ($t(36) = -1.81$, $p = .077$, $Std.\beta = -0.13$)[9]. Bien que purement exploratoire, une telle analyse semble suggérer que les participants de cette neuvième étude ont organisé l'information mémorisée en deux sous-ensembles. Au début de l'apprentissage, une telle segmentation aurait conduit à un renforcement temporaire des associations entre les items et leur position *relative* au sein de chaque chunk, expliquant la détection d'une tendance à la spatialisation dans l'analyse opposant les positions initiales et les positions finales des deux sous-éléments.

La question se pose à présent de savoir ce qu'il adviendrait de la spatialisation une fois ces deux chunks consolidés en mémoire à long terme. En considérant qu'un seul chunk puisse être codé sous un unique marqueur spatial (comme suggéré dans les résultats de l'Expérience 8), l'on pourrait s'attendre à ce que le maintien de différents chunks en mémoire de travail puisse solliciter l'usage de différents marqueurs, chaque pointeur spatial faisant référence au chunk qui lui est associé. Une telle proposition reste cohérente avec l'hypothèse fonctionnelle proposée dans l'introduction de ce chapitre : la spatialisation interviendrait non plus pour coder l'ordre des items au sein de chaque chunk (celui-ci étant déjà connu du système cognitif), mais pourrait en revanche être recrutée à un niveau hiérarchique supérieur afin de coder l'ordre entre différents chunks. En considérant donc que le chunk [AB] constitue le premier élément de la série [AB][CD], ce dernier serait alors préférentiellement associé à un marqueur gauche au deuxième stade de l'apprentissage. À l'inverse, le chunk [CD] – dernier élément de la série [AB][CD] – serait préférentiellement associé à un marqueur droit (voir la Figure 4.7b). Sur le plan comportemental, l'on observerait alors un avantage de la main gauche lorsque les items A et B sont testés, et un avantage de la main droite pour les items C et D, résultant en des différences de temps de réponse positives pour les deux premiers items, et négatives pour les deux derniers items. La Figure 4.7b illustre la pente de spatialisation théoriquement attendue sous cette hypothèse, et présente la pente empiriquement observée dans le deuxième bloc de cette neuvième étude. Bien que nos données montrent visuellement un regroupement des différences de temps de réponse dans le pôle positif pour les deux premières positions, et un regroupement dans le

[9] Cette même analyse a par ailleurs atteint le seuil de significativité dans le deuxième quart de la tâche ($d_{TR-\mathrm{P1/P3}} = 100$ ms, $ET = 332$ ms, $d_{TR-\mathrm{P2/P4}} = -58$ ms, $ET = 435$ ms ; $\beta = -160$, $t(32.03) = -2.12$, $p = .042$, $Std.\beta = -0.20$).

pôle négatif pour les deux dernières positions, une analyse réalisée sur les données agrégées (P1/P2 contre P3/P4) n'a pas permis de relever une pente significative ($p = .42$) ; un résultat nous empêchant de statuer clairement en faveur de cette interprétation.

En définitive, cette neuvième étude a permis d'affiner la compréhension de la consolidation du SPoARC au fil d'un apprentissage répété, en montrant que l'effet emprunte des trajectoires différentes en fonction de l'âge. Nous proposons ici que ces différences puissent être expliquées par des stratégies de segmentation distinctes entre nos deux échantillons, les participants de l'Expérience 9 ayant pu préférentiellement grouper la série en deux unités, en lieu et place du chunk unique recruté chez l'adulte. La segmentation de la séquence en deux unités distinctes aurait alors conduit à un renforcement local des associations entre items et positions au sein des chunks, suivie d'une spatialisation globale, appliquée aux chunks eux-mêmes. Une telle interprétation semble coïncider avec le fait que les pentes de spatialisation apparaissent de plus en plus négatives au fil des répétitions à l'analyse visuelle des données (le pattern de spatialisation attendu une fois les deux chunks élaborés en mémoire s'approchant davantage des patterns classiquement observés pour des séquences nouvelles, avec les items du premier chunk à gauche et les items du deuxième chunk à droite). Cependant, là où l'hypothèse d'une segmentation en deux chunks semble plausible au regard de la littérature (e.g., Jones, 2012 ; Smalle et al., 2016), il demeure possible que cette stratégie n'ait pas été recrutée par l'ensemble des participants de cette neuvième étude : parce que notre tâche n'imposait aucun découpage prédéfini, des différences inter-individuelles auraient pu conduire à l'élaboration de divers chunks, tels que [A][BCD], [ABC][D], ou encore [ABCD], en fonction des individus. Ce manque de consistance pourrait expliquer pourquoi l'analyse des positions agrégées proposée plus haut pour tester l'hypothèse des doubles chunks n'a pas conduit à des patterns significatifs (à l'exception du résultat obtenu pour le second sous-bloc, qu'il convient toutefois d'interpréter avec prudence en raison d'une répartition non équitable des données).

Pour mieux limiter l'impact de ces possibles différences de segmentation sur la détection de l'effet en début d'apprentissage, l'Expérience 10 proposera d'examiner la consolidation du SPoARC pour des séquences de deux items. De telles séquences pourraient offrir des conditions plus favorables à la réplication de la trajectoire observée chez l'adulte : sous ces conditions expérimentales, un renforcement temporaire des associations items/positions pour les deux seuls éléments de la séquence devrait être observé en début d'apprentissage, suivi d'une disparition du SPoARC une fois les deux items groupés en une unité singulière en mémoire, et sans risque de produire différents sous-chunks compliquant la détection de l'effet comme cela pourrait être le cas avec quatre items.

4.4 Expérience 10

4.4.1 Objectif

Cette dernière étude visait à mieux examiner la consolidation du SPoARC chez l'enfant avec des séries de deux items. En limitant les diverses formes de chunking possibles avec plus de deux éléments, nous avons émis l'hypothèse de pouvoir observer une trajectoire plus typique de celle observée chez l'adulte dans l'Expérience 8. Dans la présente étude, l'expression d'une spatialisation franche en début d'apprentissage pour les deux items codés répétitivement était donc anticipée, tandis qu'une absence d'effet était envisagée dans la deuxième partie de la tâche. Cette dernière expérience visait également à réexaminer le lien entre spatialisation et apprentissage afin de déterminer si une relation pouvait plus favorablement être identifiée entre ces deux composantes grâce à notre protocole révisé. Cette dixième étude a enfin proposé la mesure de l'effet au sein d'un groupe contrôle, pour lequel des séries de deux items variaient d'un essai à l'autre. L'analyse du SPoARC dans ce groupe contrôle visait à répondre à deux objectifs. Il s'agissait premièrement d'examiner si une telle condition expérimentale permettait la détection d'un SPoARC en fin d'école élémentaire, là où une tâche à deux items n'avait pas permis de mettre en évidence une spatialisation chez des enfants plus jeunes, malgré son efficacité chez une population adulte (Vivion et al., 2025b). Ce groupe contrôle offrait également la possibilité d'examiner l'évolution du SPoARC au fil d'une tâche de spatialisation avec un meilleur contrôle du nombre de tests par position entre la première et la seconde moitié des essais. Nos résultats sur les données non-répétées ont en effet montré des patterns divergents quant à la trajectoire de l'effet dans le cas de séquences nouvelles, le SPoARC tendant tant à apparaître (Expérience 8) qu'à disparaître (Expérience 9) au fil des essais. L'interprétation de ces patterns restant par ailleurs limitée dans la mesure où une segmentation par bloc n'avait pas été anticipée lors de la conception de ces études comparatives, nous avons estimé qu'un meilleur contrôle du nombre de tests par position permettrait d'asseoir davantage nos conclusions.

4.4.2 Méthode

4.4.2.1 Participants

Cette dixième étude comptait un échantillon de 72 participants scolarisés en dernière année d'école élémentaire (âge moyen = 10.7 ans, ET = 0.32 ans), répartis équitablement entre les deux conditions expérimentales. Tous les enfants présentaient une vision normale ou corrigée, et aucun ne présentait de trouble moteur, cognitif

ou psychique connu. L'échantillon regroupait un total de 41 filles et 31 garçons (64 droitiers, six gauchers et deux ambidextres). Soixante-deux enfants avaient le français pour langue maternelle. Les dix participants restants étaient respectivement de langue maternelle albanaise, anglaise, arabe, comorienne, géorgienne, italienne, portugaise, roumaine, russe et tchétchène ; l'ensemble de ces participants parlant par ailleurs couramment le français. Les enfants ont été recrutés au sein de deux établissements publics de la ville de Nice, et ont été rencontrés entre le deuxième et le troisième trimestre de l'année scolaire.

4.4.2.2 Matériel

Le programme PsychoPy ainsi que les stimuli utilisés étaient les mêmes que dans l'Expérience 9 (une série de huit fruits, complétée par une série de huit animaux utilisés pour l'entraînement dans la condition répétée).

4.4.2.3 Procédure

La procédure était identique à celle de l'Expérience 9 : les participants ont été rencontrés sur deux sessions expérimentales, espacées d'a minima quelques heures. Chaque session était composée d'un entraînement (4 essais) et d'une phase de test (32 essais, comprenant chacun une phase de mémorisation et une phase de reconnaissance). Les essais étaient manuellement lancés par l'expérimentateur qui disposait d'un écran annexe pour suivre la passation. Chaque réponse était suivie d'un feedback indiquant au participant si sa réponse était correcte, incorrecte ou s'il n'avait pas répondu dans le temps imparti. Pour la moitié des participants, les 32 essais consistaient en des séquences différentes, tandis que l'autre moitié des participants mémorisait une unique séquence sur l'ensemble de la session. Dans les deux conditions expérimentales, le nombre de tests par position a été équilibré à la fois sur les 16 premiers et les 16 derniers essais, pour un total de quatre tests par bloc, soit huit tests par position dans chaque session. Cette procédure était ensuite répétée lors d'une deuxième session expérimentale, dans laquelle les participants devaient répondre avec une assignation réponse/main opposée. Pour des raisons de calendrier, la tâche de rappel à long terme n'a pas pu être conduite pour les participants de la condition répétée.

4.4.3 Résultats

4.4.3.1 Analyses préliminaires

Taux de réussite Le taux de réussite moyen atteint dans la condition répétée était égal à .97 (ET = .02, min = .91, max = 1), tandis que les participants dans la tâche non-répétée ont présenté un taux de réussite égal à .96 en moyenne (ET = .04, min = .86, max = 1). Une ANOVA à deux facteurs (Type de séquence × Bloc) a révélé que la différence entre ces performances globales n'était pas significative ($F(1, 70) = 0.51, p = .477, \eta^2_p = .01$). Des performances similaires ont également été atteintes entre les deux blocs, que ce soit pour la condition répétée (m_{B1} = .967, ET = .03 et m_{B2} = .969, ET = .03) ou pour la condition non-répétée (m_{B1} = .961, ET = .04 et m_{B2} = .964, ET = .05), l'interaction entre le type de séquence et le bloc n'ayant pas atteint le seuil de significativité dans l'analyse de variance ($F(1, 70) = 0.01, p = .999, \eta^2_p = .001$).

Régression des temps de réponse en fonction du numéro d'essai Une analyse des temps de réponse en fonction du numéro d'essai a été exécutée, en premier lieu pour les participants ayant réalisé la tâche en condition répétée. Les temps de réponse obtenus pour l'ensemble des sondes (i.e., cibles et leurres) ont été winsorisés, conduisant au remplacement de 4.7% des données. Les modèles de régression ont permis d'observer une diminution significative des temps de réponse pour les deux séquences mémorisées ($t(1142) = -5.08$, $p < .001$, $Std.\beta = -0.12$ et $t(1138) = -2.19$, $p = .029$, $Std.\beta = -0.05$ respectivement ; voir la Figure D.11 en Annexe D). La même analyse réalisée à l'échelle de chaque bloc a montré que cette diminution des temps de réponse était particulièrement visible sur la première moitié de la tâche (i.e., Bloc 1, correspondant aux Essais 1 à 16, $\beta = -8$, $t(1145) = -4.66$, $p < .001$, $Std.\beta = -0.10$; contre $\beta = -1.04$, $t(1135) = -0.57$, $p = .57$, $Std.\beta = -0.01$ pour le Bloc 2)[10].

À des fins de contrôle, les mêmes modèles ont été exécutés sur les temps de réponse winsorisés de la condition non-répétée. Aucun modèle n'a atteint le seuil de significativité, que ce soit en considérant les données de chaque session indépendamment ($\beta = 0.25$, $t(1137) = 0.29$, $p = .77$, $Std.\beta = 0.001$ pour la Session 1 et $\beta = 0.42$, $t(1144) = 0.48$, $p = .631$, $Std.\beta = 0.01$ pour la Session 2, voir la Figure D.12 en Annexe D), ou en centrant l'analyse sur la première et la deuxième partie de la tâche, toutes sessions confondues ($\beta = 0.15$, $t(1143) = 0.08$, $p = .934$, $Std.\beta = 0.001$ pour le

[10] Des modèles de régression logistique réalisés sur la précision des réponses (codée 1 en cas de réponse correcte et 0 en cas de réponse incorrecte) n'ont pas montré d'amélioration significative de la performance au fil de la tâche ($p = .683$, $\beta Std. = -0.09$ et $p = .051$, $\beta Std. = 0.35$ pour les deux séquences mémorisées ; $p = .706$, $\beta Std. = 0.06$ et $p = .243$, $\beta Std. = -0.26$ dans chaque bloc).

Bloc 1 et $\beta = -1.89$, $t(1138) = -1.05$, $p = .294$, $Std.\beta = -0.02$ pour le Bloc 2)[11].

Temps de réponse En vue d'examiner l'effet SPoARC, une seconde winsorisation a été appliquée uniquement aux temps de réponse obtenus pour les items cibles. Cette winsorisation a conduit à la transformation de 4.5% des données. Pour la condition répétée, le temps de réponse moyen était égal à 984 ms (ET = 390 ms). Les temps de réponse moyens observés dans chaque bloc étaient respectivement égaux à 987 ms (ET = 372 ms) et 981 ms (ET = 408 ms). Dans la condition non-répétée, le temps de réponse moyen était égal à 1013 ms (ET = 338 ms), avec des temps de réponse moyens égaux à 1013 ms (ET = 332 ms) pour le Bloc 1 et à 1014 ms (ET = 345 ms) pour le Bloc 2. Aucune tendance à privilégier la vitesse au détriment de l'exactitude n'a été relevée dans les deux conditions expérimentales ($\rho = -.11, p = .522, N = 36$ pour la condition répétée et $\rho = 0.13, p = .453, N = 36$ pour la condition non-répétée).

4.4.3.2 Effet de spatialisation : Modèles mixtes linéaires généralisés

Des modèles mixtes généralisés ont été effectués sur les temps de réponse des participants afin d'évaluer la présence d'un effet SPoARC, et son éventuelle variation au fil de la tâche. Les modèles ont été exécutés sur la base de quatre facteurs d'intérêt (Position, Main, Type de séquence et Bloc) et deux facteurs aléatoires (Item et Sujet). Une distribution Gamma a été prise comme distribution de référence dans cette analyse afin de tenir compte de l'asymétrie des temps de réponse winsorisés (voir la Figure D.13 en Annexe D). La même logique hiérarchique que celle appliquée dans les expériences précédentes a été utilisée pour élaborer les modèles, à savoir l'ajout progressif d'effets aléatoires, principaux, d'interactions de premier et de second ordre, pour terminer avec le modèle rendant compte de l'interaction de tous les facteurs d'intérêt (voir le Tableau D.15 en Annexe D pour un aperçu des différents modèles implémentés).

Le modèle avec la plus faible valeur d'AIC était le modèle $M6$, qui rendait compte d'une interaction entre les facteurs Position et Main, indiquant la présence d'un effet SPoARC sur l'ensemble des conditions expérimentales. Ce modèle a été retenu pour les analyses subséquentes dans la mesure où il différait significativement du modèle classé second ($M2$, $\chi^2(4) = 11.39$, $p = .023$, voir le Tableau D.15 en Annexe D pour le classement d'AIC). Dans l'analyse détaillée du modèle $M6$, l'interaction Main × Position a atteint le seuil de significativité, les temps de réponse ayant été plus courts de la main gauche pour la première position, et plus courts de la main droite pour la deuxième position (m_{D-P1} = 1023 ms, ET = 364 ms, m_{G-P1} = 997 ms, ET = 362 ms, m_{D-P2} = 967 ms, ET = 362 ms, m_{G-P2} = 1007 ms, ET = 373 ms ; $\beta = 64.84$,

[11] Cette absence d'effet a également été constatée sur la précision des réponses (tous les $|z| \leq 1.22$, tous les $p \geq .223$, tous les $|Std.\beta| \leq 0.20$)

$ES = 5.91$, $t(2213) = 10.97$, $p < .001$, $Std.\beta = 32.43$). Bien qu'elle ait pu mettre en évidence la présence d'un SPoARC pour l'ensemble de l'échantillon, cette première analyse n'a pas permis d'observer que l'effet variait significativement en fonction du type de séquence mémorisée par les participants, ou encore qu'une spatialisation aurait pu se manifester différemment en début ou en fin de tâche. La Figure D.14 en Annexe D rend compte à titre indicatif des pentes obtenues pour la main droite et pour la main gauche dans chaque bloc et pour chaque type de séquence.

4.4.3.3 Effet de spatialisation par régression linéaire

La présence d'un SPoARC sur l'ensemble de l'échantillon a été confirmée par une analyse de régression linéaire. En considérant l'ensemble des participants, les d_{TR} diminuaient significativement de 63 ms par position ($d_{TR-P1} = 22$ ms, $ET = 178$ ms, $d_{TR-P2} = -41$ ms $ET = 186$ ms ; $t(71) = -2.69$, $p = .009$, $Std.\beta = -0.17$). Une analyse détaillée des pentes obtenues pour chaque type de séquence a ensuite été réalisée. Dans la condition répétée, les résultats ont indiqué que les d_{TR} diminuaient en moyenne de 70 ms par position, sans que ce coefficient ne diffère significativement de zéro ($d_{TR-P1} = 14$ ms, $ET = 196$ ms, $d_{TR-P2} = -56$ ms, $ET = 200$ ms ; $t(35) = -1.76$, $p = .087$, $Std.\beta = -0.18$). Les pentes de spatialisation obtenues pour les séquences répétées ont ensuite été comparées entre la première et la deuxième partie de la tâche. Aucun SPoARC n'a été détecté, que ce soit dans le premier Bloc ($d_{TR-P1} = 6$ ms, $ET = 210$ ms, $d_{TR-P2} = -68$ ms, $ET = 249$ ms ; $\beta = -73$, $t(35) = -1.59$, $p = .121$, $Std.\beta = -0.16$) ou dans le deuxième ($d_{TR-P1} = 24$ ms, $ET = 263$ ms, $d_{TR-P2} = -49$ ms, $ET = 264$ ms ; $\beta = -73$, $t(35) = -1.24$, $p = .222$, $Std.\beta = -0.14$). La Figure 4.8 rend compte des pentes obtenues dans la première et la deuxième partie de la tâche pour cette condition expérimentale.

Ces analyses ont ensuite été répliquées pour la condition non-répétée. En considérant l'ensemble des données, une pente de spatialisation significative a été observée, les d_{TR} diminuant en moyenne de 57 ms par position ($d_{TR-P1} = 31$ ms, $ET = 161$ ms, $d_{TR-P2} = -26$ ms, $ET = 173$ ms ; $t(35) = -2.20$, $p = .034$, $Std.\beta = -0.17$). Par ailleurs, la trajectoire attendue en condition répétée s'est avérée émerger de façon plus inattendue dans la condition non-répétée : en séparant les données par bloc, un SPoARC significatif était détectable dans la première partie de la tâche ($d_{TR-P1} = 72$ ms, $ET = 183$ ms, $d_{TR-P2} = -34$ ms, $ET = 213$ ms ; $\beta = -106$, $t(35) = -3.12$, $p = .004$, $Std.\beta = -0.26$), tandis qu'aucun effet n'a pu être observé dans la deuxième partie ($d_{TR-P1} = 12$ ms, $ET = 226$ ms, $d_{TR-P2} = -18$ ms, $ET = 240$ ms ; $\beta = -30$, $t(35) = -0.59$, $p = .558$, $Std.\beta = -0.06$). La Figure 4.8 illustre également les pentes obtenues dans chaque bloc pour les séquences non-répétées.

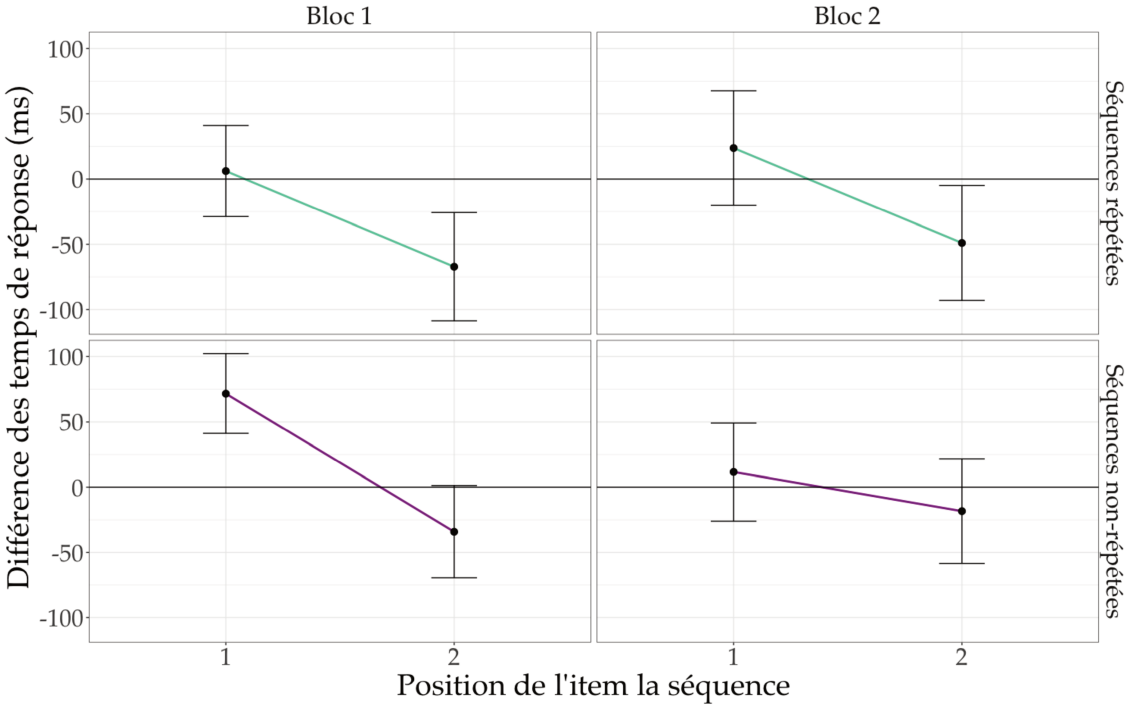


FIGURE 4.8 – Régression linéaire de la différence des temps de réponse (d_{TR}) moyens entre main droite et main gauche en fonction de la position de l'item, du bloc et du type de séquence mémorisées par les participants de l'Expérience 10. *Note.* La séparation entre les deux blocs est intervenue à mi-parcours de chaque session expérimentale, à l'insu des participants. La figure a été réalisée sur les données agrégées par position, par sujet et par session expérimentale, et les barres d'erreur correspondent à ± 1 Erreur Standard.

4.4.3.4 Analyse exploratoire : découpage par sous-blocs

Modèles linéaires mixtes généralisés Dans le but d'analyser plus finement la variation du SPoARC au fil des tâches répétée et non-répétée, des analyses supplémentaires ont été réalisées en segmentant les données en quatre sous-blocs successifs. Les mêmes modèles que ceux implémentés précédemment ont été créés en tenant compte cette fois-ci du facteur Sous-bloc (voir le Tableau D.15 en Annexe D pour une description). Le modèle classé premier était le modèle $M6$, rendant compte de l'interaction Main × Position caractéristique du SPoARC. Par ailleurs, ce modèle ne différait pas significativement du modèle classé second sur le plan de sa vraisemblance ($M12$, $\chi^2(3) = 3.08$, $p = .379$). Une analyse détaillée du modèle $M12$ a été ici privilégiée, ce dernier rendant compte d'une interaction de plus grand intérêt pour cette étude (à savoir une modulation de la spatialisation en fonction du sous-bloc). Il est à noter cependant que ce deuxième modèle n'a pas pu être comparé au modèle classé troisième ($M13$, rendant compte également d'une interaction de second ordre entre les facteurs Main × Position × Type de séquence), dans la mesure où ces derniers ne présentaient pas une structure strictement emboîtée et disposaient du même nombre de paramètres. Par ailleurs, le modèle $M12$ différait significativement du modèle classé en quatrième position ($M2$, $\chi^2(7) = 16.18$, $p = .024$). L'analyse détaillée du modèle $M12$ a révélé une interaction significative des facteurs Main × Position × Sous-bloc, indiquant une modulation de l'effet au fil de la tâche quel que soit le type de séquence mémorisée ($\beta = 10.82$, $ES = 5.43$, $t(2210) = 1.99$, $p = .046$, $Std.\beta = 6.05$)[12].

Régression linéaire La variation du SPoARC en fonction du sous-bloc a davantage été éprouvée par le biais de régressions linéaires effectuées sur la différence des temps de réponse entre main droite et main gauche. Les résultats pour la condition répétée n'ont pas permis d'identifier de pentes de spatialisation significatives, bien que le coefficient obtenu pour la pente du troisième sous-bloc se soit avéré marginalement différent de zéro ($\beta = -175$, $t(65) = 1.69$, $p = .096$, $Std.\beta = -0.21$; tous les autres $|t| \leq 1.45$, tous les autres $p \geq .151$, tous les autres $|Std.\beta| \leq 0.18$). Pour la condition non-répétée, seule la pente obtenue dans le deuxième sous-bloc s'est avérée significativement différente de zéro ($\beta = -160$, $t(32.89) = -3.09$, $p = .004$, $Std.\beta = -0.34$; tous les autres $|t| \leq 1.13$, tous les autres $p \geq .264$, tous les autres $|Std.\beta| \leq 0.14$). Bien que les analyses statistiques aient montré des différences de significativité entre conditions, les pentes de spatialisation semblent suivre des dynamiques visuellement semblables. Comme le montre la Figure 4.9, la mémorisation de séquences répétées et non-répétées a conduit à une évolution comparable de l'effet SPoARC au fil de la tâche.

[12] L'interaction Main × Position × Type de séquence a tout de même était testée dans une analyse détaillée du modèle $M13$ (classé troisième), laquelle n'a pas conduit à un résultat significatif ($\beta = -0.68$, $ES = 5.38$, $t(2210) = -0.13$, $p = .900$, $Std.\beta = -1.35$).

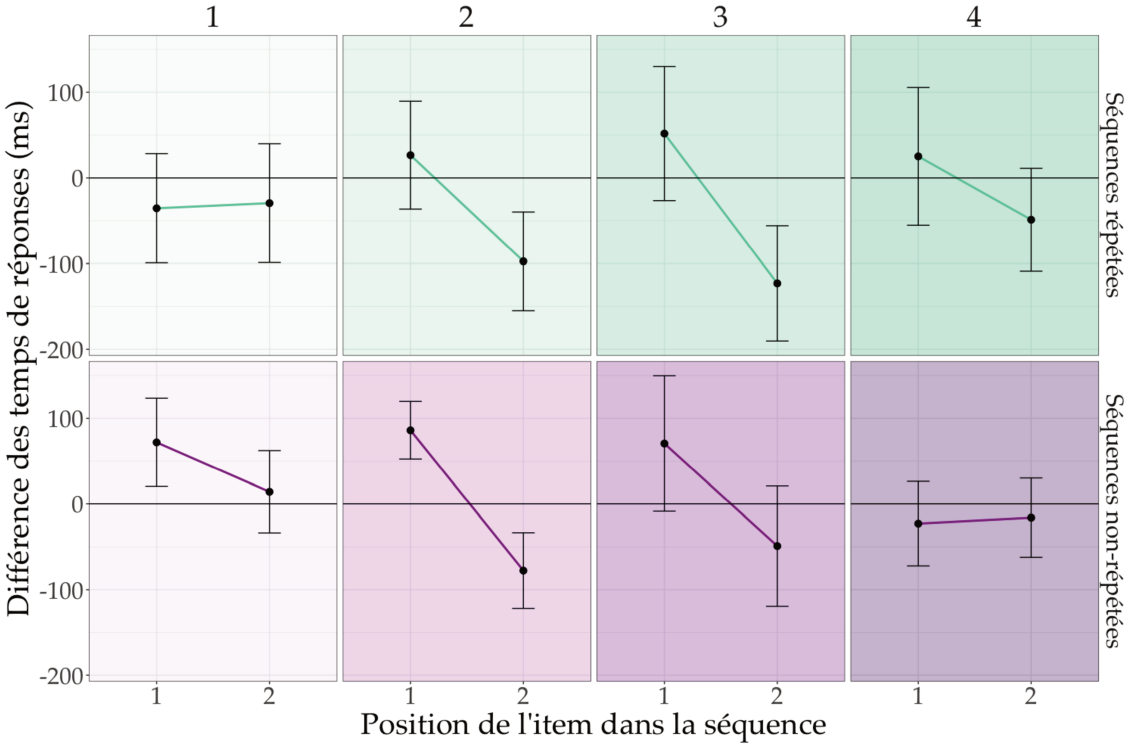


Figure 4.9 – Régression linéaire de la différence des temps de réponse (d_{TR}) moyens entre main droite et main gauche en fonction de la position de l'item et du sous-bloc pour les séquences répétées et non-répétées de l'Expérience 10. *Note.* Le dégradé en arrière-plan délimite quatre sous-blocs consécutifs. La figure a été réalisée sur les données agrégées par position, par sujet et par session expérimentale, et les barres d'erreur correspondent à $\pm$ 1 Erreur Standard.

4.4.3.5 Spatialisation et apprentissage

De la même manière que pour les études précédentes, une dernière série d'analyses a tenté de mettre en lien la spatialisation et les capacités d'apprentissage des participants dans la condition répétée. Aucun lien significatif entre ces deux composantes n'a pu être mis en évidence dans cette dixième étude (voir l'Analyse D.4 en Annexe D pour un détail des analyses effectuées).

4.4.4 Discussion

Cette dernière étude a tenté d'examiner la consolidation du SPoARC chez l'enfant d'âge scolaire par le biais d'une tâche répétée impliquant la mémorisation d'une séquence de deux items. En s'appuyant sur les résultats obtenus chez l'adulte, il était anticipé que les éléments de cette séquence seraient spatialisés en début d'apprentissage, et que cette spatialisation s'effacerait une fois la série groupée en mémoire à long terme. Cette dixième étude impliquait également la mesure de l'effet dans une condition contrôle, pour laquelle les participants mémorisaient des séquences nouvelles d'un essai à l'autre.

Les résultats obtenus dans la condition contrôle ont premièrement permis d'identifier un SPoARC significatif en tenant compte de l'ensemble des essais. En considérant conjointement ce résultat et ceux du chapitre précédent, il apparaît ainsi que l'effet SPoARC tend à se généraliser à différentes longueurs de séquences chez l'enfant scolarisé en fin d'école élémentaire (un effet ayant pu être mis en évidence tant pour des séries de deux, de trois[13] et de quatre items dans cette population). Une telle généralisation s'observe par ailleurs également chez l'adulte : bien que des longueurs de quatre items soient à l'origine d'un effet maximal, le SPoARC reste visible avec des séries de deux et de trois items (voir par exemple Vivion et al., 2025b). Cependant, des disparités subsistent entre ces deux classes d'âge, comme l'indique l'analyse en deux blocs effectuée sur les données non-répétées de cette dixième étude. En contrastant le SPoARC dans la première et la deuxième partie de la tâche, nos résultats ont en effet montré une spatialisation significative uniquement sur les 16 premiers essais. Ce résultat rappelle la trajectoire déjà observée en CM2 pour les données non-répétées analysées dans l'Expérience 9, pour lesquelles une disparition de l'effet avait également été observée dans la deuxième moitié d'une tâche à quatre items. En mettant en évidence une évolution similaire dans la présente étude, nous confirmons que le SPoARC peut s'avérer instable chez l'enfant, et que son occurrence peut être amenée à décliner avec le temps lorsque des séquences nouvelles sont traitées en mémoire de travail. Une

[13] Bien que l'effet se soit avéré plus difficilement détectable pour trois items.

telle évolution diffère par ailleurs de celle identifiée chez l'adulte, chez qui la spatialisation tendait davantage à se renforcer au fil des essais. Cette différence pourrait dénoter un mécanisme fonctionnel évolutif en fonction de l'âge, permettant aux individus de s'appuyer de façon flexible sur un recodage spatial selon les difficultés ou la nature de la tâche, comme développé ci-dessous.

Deux explications possibles pourraient être ici proposées pour rendre compte d'une telle disparition chez l'enfant dans le cas de séquences nouvelles. Une première interprétation consisterait à lier la disparition du SPoARC à des effets d'habituation à la tâche, les participants ayant moins recours à une spatialisation à mesure que la familiarité avec une tâche en cours s'accentue. Dans la présente étude, aucun indice en faveur d'un tel effet d'habituation n'a néanmoins pu être observé. Les participants ne montraient par exemple pas d'amélioration significative de leur performance ou ne tendaient pas à répondre plus rapidement au fil des essais (bien que cette absence de résultat puisse résulter d'un plafond rapidement atteint dès le début de la tâche, en particulier en raison de l'utilisation de séquences courtes). Une habituation n'a également pas été retrouvée dans la tâche non-répétée avec quatre items réalisée chez l'enfant. Au contraire, les participants tendaient à présenter des performances significativement plus faibles dans la seconde moitié de la tâche. À la vue de ce résultat, il peut donc être considéré que la disparition du SPoARC en condition non-répétée puisse être mieux expliquée par des effets d'interférence proactive. De tels effets résulteraient de l'accumulation progressive des séquences traitées au cours de la tâche, la multiplication des essais rendant de plus en plus difficile l'élaboration d'une représentation spatiale des items pour les séries suivantes. Dans une tâche à quatre items, l'impact de cette interférence serait à la fois visible tant sur la spatialisation que sur les performances des participants (témoignant d'une interférence possiblement liée à la fois aux items et à leurs positions), tandis qu'il se limiterait à l'effet SPoARC pour une tâche moins exigeante sur le plan mnésique (témoignant uniquement d'une interférence liée à l'ordre). Une telle interprétation fait écho à l'introduction de ce chapitre, dans laquelle nous proposions que la spatialisation en mémoire nécessiterait une mise à jour constante et flexible des items codés sur la ligne mentale. Bien qu'elle puisse s'observer chez l'enfant de CM2, une telle mise à jour pourrait s'avérer plus difficile à recruter en fonction de l'augmentation du nombre de séquences codées successivement en mémoire au cours de la tâche. Ces effets d'interférence proactive s'avéreraient par ailleurs moins délétères chez l'adulte en raison d'une mémoire plus mature, expliquant qu'une spatialisation ait pu être détectée en deuxième partie de la tâche non-répétée analysée dans l'Expérience 8.

En prenant en compte la totalité des essais, les résultats obtenus dans la condition répétée n'ont pas permis de révéler un effet SPoARC, de la même manière que dans nos deux études précédentes (aucune spatialisation n'ayant été observée en considérant l'ensemble des essais de l'Expérience 8 et de l'Expérience 9). Par ailleurs, l'analyse en

deux blocs n'a pas permis de confirmer la trajectoire attendue pour cette condition expérimentale. La pente de spatialisation n'était pas significative au cours du second bloc, mais là où nous supposions qu'un effet particulièrement saillant serait détectable en début d'apprentissage, la pente de spatialisation au cours du premier bloc n'a pas atteint le seuil de significativité. Un tel résultat pourrait s'expliquer par un apprentissage rapide de la séquence dès les premières répétitions, les deux items ayant pu être rapidement regroupés en un chunk. Cette idée n'est cependant pas supportée par notre analyse en quatre sous-blocs réalisée pour étudier plus finement la trajectoire du SPoARC.

Le résultat principal qui ressort de l'analyse en quatre sous-blocs concerne la similarité des trajectoires obtenues entre la condition non-répétée et la condition répétée. Si l'évolution du SPoARC apparaissait de prime abord différente entre les deux conditions dans l'analyse en deux blocs (l'effet tendant à s'effacer entre le premier et le deuxième bloc de la condition non-répétée, tandis qu'il n'était détectable ni dans le premier ni dans le deuxième bloc de la condition répétée), l'analyse en quatre sous-blocs rend finalement compte d'une progression comparable de l'effet entre les deux conditions. L'analyse des temps de réponse par le biais de modèles linéaires généralisés a en effet montré une modulation globale du SPoARC en fonction des quatre sous-blocs, sans que cette modulation ne diffère entre les deux types de séquences mémorisées. À l'analyse des patterns de spatialisation visibles sur la Figure 4.9, les pentes obtenues semblent évoluer en parallèle au fil des sous-blocs. Il apparaît premièrement que les deux conditions étaient caractérisées par une absence d'effet durant le premier quart de la tâche. Cette absence d'effet pour le premier quart pourrait résulter de l'adaptation progressive des participants à la tâche, leur temps de réponse initiaux étant trop fluctuants pour qu'un SPoARC ne soit détectable. Les temps de réponse s'avérant de plus en plus homogènes, une spatialisation aurait alors été plus facilement repérable dans les essais suivants, conduisant à des patterns caractéristiques de l'effet SPoARC pour le deuxième et le troisième sous-bloc. Dans la condition non-répétée, ces patterns témoigneraient de l'assignation de marqueurs spatiaux à l'information mémorisée, une spatialisation qui serait réitérée à chaque séquence nouvellement codée par les participants. Dans la tâche répétée, ces patterns caractéristiques du SPoARC témoigneraient de l'utilisation temporaire de marqueurs spatiaux assignés à la séquence répétée (la spatialisation s'avérant cependant moins franche que dans la condition non-répétée). Les interprétations peuvent également différer concernant l'absence de spatialisation observée dans le dernier quart de chacune des deux conditions expérimentales : comme discuté plus haut, l'absence d'un SPoARC dans la condition non-répétée pourrait s'expliquer par des effets d'interférence proactive, favorisée par la mémorisation de séries dont l'ordre varie d'un essai à l'autre (le codage spatial d'un même item fluctuant d'une

séquence à une autre). Par contraste, la disparition de l'effet en condition répétée témoignerait du regroupement des deux items mémorisés en une unité singulière à l'issue de l'apprentissage sériel, cette unité étant associée à un seul marqueur spatial sur la ligne mentale. Il convient néanmoins d'admettre que nos données ne nous permettent pas en l'état de trancher en faveur de cette double interprétation, et appellent ainsi à des manipulations expérimentales plus fines pour identifier les facteurs en jeu dans l'évolution du SPoARC dans ces deux conditions expérimentales.

4.5 Discussion générale intermédiaire

Ce dernier chapitre expérimental s'est attaché à examiner l'évolution du SPoARC au cours d'un apprentissage répété par le biais de trois expériences, menées respectivement chez l'adulte (Expérience 8) et chez l'enfant de CM2 (Expérience 9 et 10). Ces études visaient à répondre à trois objectifs principaux. Le premier consistait à déterminer si la spatialisation constitue un mécanisme général et automatique à l'encodage de l'ordre sériel en mémoire (impliquant que les items d'une séquence, qu'elle soit familière ou nouvelle, soient systématiquement assignés à des marqueurs spatiaux distinctifs), ou si ce phénomène est un mécanisme fonctionnel (bien que non délibéré), permettant de faciliter la mémorisation lorsque le traitement s'avère coûteux au regard des ressources en mémoire. En adoptant l'hypothèse fonctionnelle, nous prédisions que le système cognitif n'aurait plus la nécessité d'une spatialisation une fois l'ordre d'une séquence consolidé, l'ajout d'une valeur spatiale à chacun des items s'avérant superflu pour traiter cette séquence suffisamment familière. En admettant que l'apprentissage répété d'une même séquence conduirait à la formation d'un chunk à l'issue de la consolidation (Musfeld et al., 2024 ; Smalle et al., 2016), et en considérant que la présence de ce chunk diminue la charge en mémoire (Cowan, 2001 ; Mathy & Feldman, 2012 ; Miller, 1956), nous supposions que le codage spatial devrait bénéficier de la même économie[14]. Le deuxième objectif de ce chapitre était d'examiner si l'encodage répété d'une même séquence participerait à un renforcement temporaire du lien entre les items et leurs coordonnées spatiales en début d'apprentissage. Nous anticipions qu'un tel renforcement favoriserait la détection d'un SPoARC particulièrement saillant lors des premières itérations, avant que la séquence ne soit chunkée en une seule unité. Un dernier objectif était d'explorer la présence d'un lien entre spatialisation et apprentissage, avec comme principale hypothèse que l'enrichissement de l'information mémorisée par une dimension spatiale contribuerait à une meilleure consolidation de cette information en

[14] Nous verrons par la suite que dans le cas de plusieurs chunks, l'hypothèse fonctionnelle anticipe une spatialisation de chaque chunks, bien que, de nouveau en raison du caractère fonctionnel de l'encodage, la spatialisation de ces chunks pourrait s'observer uniquement de manière temporaire.

mémoire à long terme. Nous pensions donc observer de meilleures capacités d'apprentissage chez des individus ayant spatialisé l'information dans les premières phases de la consolidation. Cette discussion générale examinera comment les résultats de ce chapitre tendent à confirmer ou infirmer nos prédictions quant à ces trois questions principales.

Hypothèse fonctionnelle et chunking en mémoire La première étude de ce chapitre a montré que la consolidation d'une même information lors d'essais répétés conduit à l'extinction du SPoARC chez une population adulte, en accord avec l'hypothèse fonctionnelle proposée précédemment. Un tel résultat suggère que la spatialisation constitue un mécanisme flexible, susceptible d'évoluer à mesure que la familiarité d'une séquence augmente au fil de l'apprentissage. Si l'absence d'un SPoARC dans nos résultats pourrait signifier une disparition totale de la spatialisation une fois l'information consolidée en un chunk, nous proposons que le phénomène soit toujours présent en mémoire de travail, mais avec une évolution du nombre de codes spatiaux attribués aux *memoranda*. Selon un principe économique, les marqueurs initialement assignés à chacun des items pourraient être regroupés sous un seul pointeur spatial, codant pour l'intégralité de la séquence chunkée en mémoire.

En développant plus avant cette interprétation fondée sur le chunking, il peut être proposé que plus le nombre d'items codés en mémoire augmente, plus il sera difficile pour le système cognitif d'encoder l'ensemble de la série sous un unique marqueur spatial (simplement en raison de la difficulté de chunker une longue série d'items sans la segmenter). De manière éclairante, Previtali et al. (2010) ont constaté un effet SPoARC après que les participants ont appris par cœur une séquence de neuf éléments quelques jours avant la phase de test. Ce résultat ne s'oppose pas nécessairement au nôtre, dans la mesure où l'utilisation d'une série de neuf items dans la tâche de Previtali et al. (2010) pourrait ne pas avoir entraîné la formation d'un seul chunk durant la consolidation. Tosatto et al. (2023) ont par exemple constaté que la répétition d'une séquence de neuf éléments entraînait la formation de chunks de plus en plus longs à mesure que l'apprentissage progressait (par exemple des groupes de deux items, puis des groupes de trois, etc.). Les auteurs n'ont néanmoins pas observé que neuf items pouvaient être regroupés en un seul chunk par leurs participants, même après une série de mille essais. Par conséquent, une spatialisation aurait pu être détectée dans l'étude de Previtali et al. (2010) soit parce que des marqueurs spatiaux distincts ont été attribués à chacun des neuf éléments, soit – si l'on s'en tient à notre interprétation basée sur le chunking – parce que les participants ont segmenté la série en différents sous-ensembles, chacun assigné à une coordonnée spatiale différente. Une telle interprétation tend d'ailleurs à être étayée par les patterns de spatialisation visibles dans leurs résultats, les valeurs de d_{TR} pour chaque position se répartissant en deux sous-groupes (positions [1, 2, 3, 4] et positions [6, 7, 8, 9]), et s'avérant moins distinguables les uns des autres dans chacun

des deux sous-ensembles (voir Previtali et al., 2010, Figure 1 et 2).

L'idée que plusieurs chunks pourraient être associés à des coordonnées spatiales distinctes sur la ligne mentale pendant la mémorisation s'accorde aussi avec la littérature indiquant que l'ordre sériel peut être représenté sous deux dimensions lors du codage de séquences groupées (Brown et al., 2000, 2007 ; Burgess & Hitch, 1999 ; Henson, 1998 ; Lewandowsky & Farrell, 2008). Des études sur le groupement temporel suggèrent en effet que le traitement d'une séquence composée de plusieurs sous-ensembles (par exemple ABC - DEF - GHI, séparés par une pause temporelle pendant la présentation) implique un codage parallèle de la position de chaque groupe au sein de la séquence entière (ABC étant le premier groupe, DEF le deuxième et GHI le troisième) ainsi que la position des éléments au sein de chaque groupe (A étant le premier élément du premier groupe, B le deuxième élément du premier groupe, et ainsi de suite). Pour des séquences divisées en plusieurs chunks au cours de l'apprentissage, la spatialisation pourrait donc évoluer pour favoriser le traitement sériel non plus *à l'intérieur* des chunks, mais *entre* les différents chunks. En intervenant à ce niveau hiérarchique supérieur, l'assignation de marqueurs spatiaux à chaque unité distincte permettrait un encodage efficient de l'ordre de ces unités au sein de la séquence complète, jusqu'à ce que cet ordre soit suffisamment familier (i.e., la position des chunks au sein de la série s'assimilant progressivement au fil de l'apprentissage) pour que la spatialisation disparaisse de nouveau.

L'idée qu'une spatialisation puisse temporairement s'appliquer pour favoriser le traitement d'une série de chunks fait directement écho à l'hypothèse des doubles chunks proposée pour rendre compte des résultats de l'Expérience 9, dans laquelle des participants scolarisés en CM2 apprenaient une série de quatre items. Pour justifier qu'un SPoARC n'ait pas pu être détecté en début d'apprentissage de la même manière que chez l'adulte, nous supposions que ces participants plus jeunes auraient pu segmenter la série en deux sous-ensembles lors de la consolidation. Dans ce cas, les coordonnées spatiales associées aux items auraient pu refléter davantage leur position relative au sein des deux chunks, plutôt que leur position absolue au sein de la séquence entière lors des premières répétitions (par exemple, un codage des positions [1-2] et [1-2] au lieu de [1-2-3-4]). Par la suite, un tel découpage aurait conduit à une spatialisation inter-chunks, résultant de l'assignation de marqueurs spatiaux distinctifs pour chaque sous-ensemble codé en mémoire. Bien que l'analyse visuelle des patterns de spatialisation obtenus dans l'Expérience 9 puisse s'aligner avec cette interprétation, cette hypothèse n'a pas pu être statistiquement validée dans nos résultats (une absence d'effet qui pourrait néanmoins s'expliquer par un manque de consistance dans les segmentations employées entre les participants, voir Spurgeon et al., 2015 ; Yanaoka et al., 2019). Parce que l'interprétation de patterns de d_{TR} isolés reste délicate, de futures manipulations expérimentales

ciblées s'avèrent ainsi cruciales pour éprouver nos interprétations. De telles manipulations pourraient s'appuyer sur une segmentation temporelle des items pendant la mémorisation (comme proposé par exemple dans l'étude de Smalle et al., 2016 ; ou de Yanaoka et al., 2019), ou encore sur un *clustering* visuel permettant d'induire une stratégie de chunking consistante entre les participants (voir par exemple Musfeld et al., 2024). En contrôlant mieux la manière dont le regroupement de l'information opère pendant l'apprentissage répété, l'hypothèse selon laquelle la spatialisation s'appliquerait pour coder différents chunks en mémoire pourrait être mieux éprouvée. Pour enfin montrer qu'une telle spatialisation revêt réellement un caractère fonctionnel (une spatialisation inter-chunks pouvant également refléter un recodage spatial automatique simplement transposé à différentes unités plutôt qu'à différents items), de futures manipulations pourraient également tester si cette spatialisation disparaît effectivement une fois l'ordre entre les différents chunks assimilé en mémoire à long terme.

Un autre résultat qui ne permet pas de trancher en faveur de l'hypothèse de chunking développée jusqu'à présent concerne les trajectoires observées dans les tâches non-répétées utilisées à visée comparative dans ce chapitre. Nous pensions que l'effet devait perdurer dans une tâche non-répétée. Là où les résultats chez l'adulte tendent à conforter cette hypothèse, les deux études menées chez l'enfant ont montré une disparition du SPoARC dans cette tâche comparative. En l'état, il semble donc difficile de conclure que l'extinction du SPoARC au fil des essais puisse être uniquement liée à la consolidation d'une séquence en mémoire à long terme, cette disparition s'observant également lorsque des participants codent des séries dont l'ordre varie à chaque essai. Nous soutenons cependant que ces trajectoires a priori comparables pourraient résulter de mécanismes différents selon le degré de familiarité des séquences mémorisées.

Il est premièrement possible d'envisager que la disparition du SPoARC pour des séquences non-répétées est simplement liée à des fluctuations aléatoires. Sous cette hypothèse, en utilisant une durée de tâche plus longue, le SPoARC en condition non-répétée pourrait se révéler de nouveau détectable (son extinction relevant alors simplement de fluctuations transitoires), là où il ne devrait jamais réémerger si une même séquence était testée de manière prolongée dans une tâche répétée. Une deuxième interprétation concernant la disparition du SPoARC en condition non-répétée concerne les effets d'habituation et d'interférence, déjà évoqués dans la Discussion de l'Expérience 10. Si l'un ou l'autre de ces facteurs devait être en jeu, le SPoARC demeurerait absent à mesure que les essais s'accumulent (les participants étant de plus en plus habitués à la tâche, ou de plus en plus sujets à l'interférence en mémoire). Pour distinguer alors la trajectoire de l'effet pour des séquences familières ou nouvelles, une stratégie pourrait être d'évaluer la réémergence de l'effet dans la condition répétée. En admettant que le SPoARC disparaisse en raison du chunking dans cette condition expérimentale, le passage d'une séquence répétée sur-apprise à une nouvelle séquence répétée devrait

permettre d'observer de nouveau des associations spatio-positionnelles, qui s'estomperaient une seconde fois à mesure que la nouvelle séquence se consolide en mémoire. Il est à noter que cette manipulation diffère de celle utilisée jusqu'à présent : dans les études de ce chapitre, le passage d'une séquence sur-apprise à une nouvelle séquence était concomitant du changement de l'assignation réponse/main. Dans la manipulation proposée ici, l'introduction d'une nouvelle séquence opérerait au sein d'une même session, permettant d'examiner si des patterns de réponse diffèrent de nouveau entre les deux mains au démarrage de l'apprentissage de la seconde séquence.

Enfin, pour mieux comprendre les facteurs en jeu dans la disparition du SPoARC observée dans la condition non-répétée, une dernière approche pourrait consister à étudier la persistance de l'effet lorsque des participants mémorisent des séquences d'items tirés d'ensembles de stimuli ouverts (i.e., impliquant des centaines de stimuli). Une telle manipulation impliquerait que des items distincts soient mémorisés par les participants d'un essai à l'autre, sans qu'aucun élément ne soit jamais encodé une seconde fois au cours de la tâche (ce qui diffère de nos études dans lesquelles les séquences étaient constituées à partir d'un ensemble fermé d'items, soit dix fruits chez l'adulte et huit fruits chez l'enfant). L'application d'une spatialisation à des séries issues d'ensembles ouverts a déjà pu être montrée dans la littérature chez l'adulte (Guida et al., 2018a)[15]. Nous proposons que l'utilisation d'ensembles ouverts puisse s'avérer plus propice au maintien d'une spatialisation efficiente au fil des essais, notamment chez l'enfant. En effet, l'utilisation de stimuli différents d'un essai à l'autre pourrait limiter l'interférence proactive proprement liée à l'ordre des items (l'item citron étant par exemple codé en première position lors d'un premier essai, puis en troisième position dans l'essai suivant), rendant de plus en plus difficile la mise à jour de la ligne mentale au fil de la tâche. Observer alors que le SPoARC ne disparaît plus sous cette manipulation expérimentale pourrait renforcer l'hypothèse que l'interférence proactive participe effectivement à l'extinction de la spatialisation pour les séquences non-répétées, là où une trajectoire déclinante tendrait à favoriser l'hypothèse de l'habituation.

Optimisation de la détection du SPoARC chez l'enfant Dans ce chapitre, nous proposions que la détection du SPoARC chez l'enfant d'âge scolaire pourrait être optimisée par l'utilisation d'un protocole répété, lequel favoriserait un renforcement temporaire des associations spatio-positionnelles au début de l'apprentissage sériel. Un tel renforcement n'a pas pu être mis en évidence dans nos deux dernières études. Si nous nous intéressons uniquement aux résultats de l'Expérience 10 (l'absence d'un SPoARC

[15] Il est à noter que l'effet demeurait cependant plus faible dans cette condition expérimentale en comparaison à des études ayant fait usage d'ensembles fermés. Néanmoins, il ne peut être écarté que l'utilisation d'une série de cinq items dans l'étude de Guida et al. (2018a) ait pu contribuer à l'observation d'un SPoARC de plus faible magnitude, les travaux de Vivion et al. (2025b) suggérant qu'un effet maximal tend à s'observer non pas pour cinq items, mais pour quatre.

au début de la tâche répétée de l'Expérience 9 étant plus difficilement interprétable en lien avec l'hypothèse des doubles chunks), il apparaît que l'effet SPoARC que nous avons observé chez les enfants s'est manifesté de manière plus saillante dans la condition non-répétée, comparativement à la condition répétée (avant que la spatialisation ne disparaisse en fin de tâche dans les deux conditions expérimentales). Un tel résultat tend donc à fragiliser l'idée qu'utiliser des séquences répétées pourrait conduire à une meilleure détection de la spatialisation chez l'enfant, notamment pour un public chez qui la spatialisation s'avère déjà difficilement détectable dans une tâche non-répétée.

Il convient néanmoins d'admettre que les résultats de notre dixième étude restent cohérents si l'on revient au fondement de l'hypothèse fonctionnelle, qui postule que le SPoARC s'applique lorsque les ressources de la mémoire sont limitées : la répétition des séquences n'encourage guère un recours à la spatialisation, car le codage distinctif de l'ordre des items s'avère de moins en moins utile à mesure de la consolidation. Un moyen de pallier cette limite serait alors d'atteindre un compromis entre une tâche trop difficile pour qu'une spatialisation s'applique chez l'enfant (une condition avec séquences non-répétées), et une tâche trop peu exigeante pour induire un traitement spatial (une condition avec séquences répétées). Un tel compromis pourrait être atteint en mélangeant des séquences non-répétées et répétées au sein d'une même tâche hybride (une manipulation expérimentale s'approchant davantage des études classiques sur l'effet de Hebb, e.g., Hebb, 1961 ; Musfeld et al., 2023, 2024 ; Norris et al., 2018 ; Page et al., 2013 ; Smalle et al., 2016, 2018 ; Szmalec et al., 2009). La combinaison de séquences répétées et non-répétées au sein d'une même expérience pourrait permettre d'augmenter la complexité de la tâche afin d'induire le système cognitif à faire usage de la spatialisation (le participant ne pouvant prédire la nature – répétée ou aléatoire – de la séquence à venir), tout en permettant une détection optimale de l'effet en renforçant de temps à autre les liens items/position d'une unique séquence.

Rôle de la spatialisation dans l'apprentissage Ce chapitre expérimental explorait le lien entre spatialisation et apprentissage sériel, sous l'hypothèse que des participants spatialisant davantage l'ordre d'une séquence tendraient également à présenter une meilleure consolidation de cette information. Les résultats mis en évidence dans ce chapitre pourraient apporter des éléments en faveur d'une telle hypothèse. Notre première étude menée chez l'adulte suggère que la spatialisation des items en début de tâche pourrait contribuer à une meilleure consolidation de la séquence au fil des essais, dans la mesure où de plus fortes courbes d'apprentissage étaient associées à un SPoARC de plus grande intensité. Une interprétation possible à ce résultat est que l'ajout d'une valeur spatiale à l'information encodée favorise l'élaboration d'une représentation stable et saillante de la séquence, facilitant ainsi son transfert en mémoire à long terme (et permettant subséquemment un accès plus rapide à cette représentation

au moment du test de reconnaissance). Cet avantage lié à la spatialisation s'est avéré significatif uniquement en excluant les spatialiseurs inverses de l'échantillon, suggérant que l'aspect facilitateur de la spatialisation ne tient pas tant à l'attribution *générale* d'une valeur spatiale à l'information, mais bien à un traitement directionnel *spécifique*, orienté de gauche à droite.

Là où nos résultats chez l'adulte suggèrent que l'apprentissage immédiat d'une séquence répétée tend à être facilité par une spatialisation gauche-droite de l'information en mémoire, un tel résultat n'a pas pu être mis en évidence de manière significative chez l'enfant. Cette absence d'effet pourrait de prime abord indiquer que cette population ne tend pas à tirer profit d'un codage spatial des items durant les premiers stades de l'apprentissage, l'influence de la spatialisation demeurant limitée à cet âge. Néanmoins, il convient de souligner qu'un lien similaire à celui identifié chez l'adulte reste visible si l'on s'en tient à une analyse descriptive de nos données. Que ce soit dans l'Expérience 9 ou dans l'Expérience 10, les corrélations effectuées entre la pente de spatialisation des participants (à l'exclusion des spatialiseurs inverses) et leur indice d'apprentissage ont toutes deux permis d'observer une relation positive entre ces deux composantes, une spatialisation plus marquée de gauche à droite étant associée à une plus forte courbe d'apprentissage. Bien que non significatifs, de tels résultats laissent présager que la spatialisation pourrait favoriser la consolidation d'une information sérielle chez l'enfant. Par conséquent, nous pensons que d'autres paradigmes (à l'instar du protocole hybride exposé dans la section précédente) pourraient mieux révéler la présence d'un lien entre spatialisation et consolidation dans cette population.

Un dernier point concerne l'absence de lien entre spatialisation et apprentissage différé dans les trois expériences menées dans ce chapitre. Que ce soit dans le nombre d'items correctement restitués dans la tâche de rappel libre, ou dans la capacité à reconnaître les séquences mémorisées parmi des séquences leurres lors d'un rappel indicé, les performances des participants ne différaient pas, qu'ils aient ou non spatialisé la séquence. Néanmoins, l'approche méthodologique adoptée dans les études de ce chapitre pour mesurer la rétention à long terme reste trop rudimentaire pour établir de manière fiable que la spatialisation ne contribue pas à l'élaboration d'une trace mnésique durable en mémoire à long terme. Des mesures plus fines de la stabilisation de la trace mnésique au fil du temps pourraient par exemple être proposées pour préciser la manière dont une information spatialisée en début d'apprentissage persiste quelques heures, jours ou semaines après la mémorisation. Le lien entre spatialisation et apprentissage pourrait également être mieux investigué en proposant des mesures plus implicites de la consolidation, comme développé dans la Discussion Générale de cette thèse.

En conclusion, les études de ce chapitre ont permis d'établir des premières réponses

quant à l'évolution du SPoARC au fil de la consolidation mnésique. Nos résultats suggèrent que la spatialisation en mémoire de travail ne contribue que temporairement à l'encodage de l'ordre sériel, remettant en question l'hypothèse d'un mécanisme automatique général et systématique. À l'inverse, nos études semblent mettre en lumière un mécanisme fonctionnel évolutif, pouvant être recruté de manière adaptative à mesure qu'une information se réorganise ou se hiérarchise en mémoire. Bien que certaines de nos prédictions mériteraient de plus amples investigations pour être corroborées – notamment à la vue des résultats obtenus chez l'enfant – nous suggérons que l'étude de la spatialisation dans le cadre d'un apprentissage répété puisse constituer une approche pertinente, à la fois pour l'optimisation de la détection du SPoARC, mais aussi pour la compréhension et l'optimisation de l'apprentissage sériel.

Chapitre 5

Discussion générale et conclusion

5.1 Synthèse des résultats 252
5.2 Apports, limites et ouvertures 256
5.3 Perspectives 264
5.4 Conclusion 269

Depuis l'âge classique de la Grèce antique, il y a environ 2500 ans, la spatialisation est explicitement recrutée par les orateurs et les experts de la mémoire pour enrichir l'encodage et le maintien d'une série d'informations verbales en leur attribuant une dimension spatiale (Bower, 1970 ; Yates, 1966). Il y a environ quinze ans, des études expérimentales ont montré qu'un tel processus s'observe également chez des individus non-experts, qui recourent spontanément à des marqueurs spatiaux pour coder l'ordre d'informations verbales conservées en mémoire de travail (van Dijck & Fias, 2011). L'effet SPoARC constitue un marqueur comportemental de cet encodage spatial : la récupération d'items maintenus en mémoire génère des réponses directionnelles, dont l'orientation dépend de la position de l'élément dans la séquence considérée. Chez des individus occidentaux, des éléments mémorisés en premier sont par exemple plus rapidement reconnus avec la main gauche sur un continuum horizontal, tandis que des items tardifs sont associés à des réponses plus rapides par la main droite. Le recrutement spontané d'une ligne mentale gauche-droite dans la mémorisation de l'ordre sériel a été largement renseigné chez l'adulte, permettant de généraliser l'observation du SPoARC à de nombreuses conditions expérimentales (voir Guida & Campitelli, 2019, pour une synthèse). À l'inverse, peu d'études avaient encore évalué la présence de ce phénomène chez l'enfant. À l'initiation de ce travail doctoral, la littérature faisait état de deux travaux majeurs permettant d'éclairer la trajectoire développementale de l'effet. Par le biais du paradigme usuellement utilisé chez l'adulte, aucune spatialisation gauche-droite systématique n'avait pu être détectée chez l'enfant d'âge préscolaire (van Dijck et al., 2020), suggérant un seuil d'émergence lié à l'apprentissage du langage écrit. Par le biais d'un paradigme simplifié, Guida et al. (2020b) ont observé un effet SPoARC uniquement à partir de la troisième année de l'école élémentaire ; soulignant en effet l'influence possible de l'expertise en lecture/écriture sur la trajectoire du phénomène. L'objectif de cette thèse était de compléter la littérature portant sur le développement de la spatialisation en mémoire de travail, en examinant le phénomène sous trois volets expérimentaux, dont la synthèse est présentée ci-après.

5.1 Synthèse des résultats

Un **premier volet expérimental** s'est attaché à mesurer les prémices de l'effet SPoARC par le biais d'un paradigme de transposition spatiale (Drucker & Brannon, 2014 ; McCrink et al., 2017 ; Rugani et al., 2010 ; West & McCrink, 2021). Ce protocole a été administré à une population d'âge préscolaire et scolaire, en comparaison avec une population adulte. Dans les quatre expériences de ce chapitre, les participants devaient mémoriser la position d'un item placé au sein d'une série de boîtes disposées le long d'un axe sagittal (Expériences 1, 2 et 3) ou vertical (Expérience 4). Après plusieurs essais d'entraînement, il était demandé aux participants de relocaliser l'item

cible sur un axe transposé à l'horizontale. Sous l'hypothèse que l'information sérielle serait traitée selon un biais spatial gauche-droite, il était attendu qu'un item placé en deuxième position sur l'axe sagittal/vertical soit préférentiellement relocalisé dans la deuxième boîte en partant de la gauche de l'axe horizontal. Dans ces quatre études, l'encodage de la position cible lors des essais d'entraînement était réalisé en l'absence de tout label ordinal explicite (numérique ou alphabétique). Une telle manipulation visait à favoriser la mesure d'un biais spatial spontané au moment du test, afin de s'approcher davantage de la spatialisation implicite propre au cadre du SPoARC (soit une spatialisation indépendante de représentations spatiales ordinales déjà stockées en mémoire à long terme).

Après avoir contrôlé différents facteurs méthodologiques susceptibles d'entraver l'expression de ce biais spontané (e.g., position de l'expérimentateur, point d'ancrage de l'encodage en modalité sagittale, prévention d'une rotation mentale pendant la transposition de l'axe), nos résultats ont mis en évidence l'émergence d'une spatialisation orientée de gauche à droite dès l'âge de quatre ans (MS). L'effet s'est néanmoins avéré robuste uniquement à partir de sept ans (CE1), bien que se révélant de nouveau moins marqué à dix ans (CM2). De tels résultats suggèrent premièrement que l'expression d'associations spatio-positionnelles rudimentaires peut être mise en évidence dès l'âge préscolaire par le biais d'un paradigme simplifié (fondé sur une transposition perceptuelle de l'axe horizontal mental en un axe tangible, et sur l'allégement de la charge mnésique *via* l'encodage d'une seule position cible). L'apparition du biais à un stade précoce du développement rend également compte du rôle médiateur de l'environnement culturel sur la manière dont l'ordre sériel est spatialisé par le jeune enfant (l'environnement culturel pouvant véhiculer des habitudes gauche-droite dans divers comportements, comme la lecture aux enfants, ou la manipulation du matériel scolaire en maternelle, mais indépendamment de toute maîtrise de la lecture ou de l'écriture par l'enfant). Par ailleurs, la présence d'un biais robuste à partir du CE1 tend à confirmer l'effet cumulatif de l'apprentissage du langage écrit sur la consolidation de ce biais spatial au cours du développement. Une telle consolidation n'a pas pu être explicitement identifiée dans notre dernière étude, notamment en raison d'un point de fléchissement survenu à un âge où la maîtrise de la lecture et de l'écriture était supposément maximale (i.e., en CM2). Ce dernier résultat appelle à envisager de possibles pistes d'amélioration pour favoriser une détection plus fiable de ce biais élémentaire, des pistes qui seront plus amplement développées dans la partie Perspectives de cette discussion générale.

Un **deuxième volet expérimental** visait à examiner le développement de l'effet SPoARC par le biais de la tâche canonique habituellement employée chez l'adulte (fondée sur la mesure de temps de réponse). Outre le fait de permettre une comparaison directe de la manifestation de l'effet entre enfants et adultes sous des conditions expérimentales similaires, les études reportées dans ce second volet visaient également

à obtenir une mesure quantitative de la spatialisation en vue d'une approche corrélationnelle. L'Expérience 5 a tenté d'isoler un paradigme optimal dans la détection de l'effet SPoARC chez l'adulte, en manipulant conjointement le type de stimulus mémorisé durant la tâche et le nombre de sondes présentées au participant en vue d'une reconnaissance. Sur la base de cette étude, un protocole impliquant la mémorisation d'images et la reconnaissance d'une seule cible après la séquence a été administré à des participants plus jeunes, en ciblant trois paliers de scolarité (CP, CE2 et CM2). Nos résultats ont montré l'émergence de l'effet SPoARC chez l'enfant scolarisé en CE2, un âge auquel l'étude de Guida et al. (2020b) avait déjà pu mettre en évidence une spatialisation par le biais d'un protocole simplifié. La manifestation du SPoARC pour ce groupe d'âge s'est par ailleurs révélée dépendante du nombre d'items mémorisés par les participants, l'effet ayant préférentiellement été détecté dans une tâche à trois items dans notre Expérience 6. Un tel résultat n'a cependant pas pu être répliqué en utilisant une même longueur de séquence dans l'Expérience 7, révélant une manifestation sporadique de la spatialisation à cet âge. Nos résultats montrent également que l'effet SPoARC tend à persister au cours du développement : dans l'Expérience 6, une spatialisation a pu être détectée en CM2, l'effet s'avérant moins dépendant de la longueur de la séquence à cet âge. À l'inverse, aucune de nos manipulations expérimentales n'a permis d'identifier un effet SPoARC chez les enfants scolarisés en CP. De la même manière que l'étude de van Dijck et al. (2020) menée chez un public préscolaire, une analyse individuelle a néanmoins révélé la présence de spatialiseurs significatifs dans l'échantillon, lesquels ne tendaient pas à présenter un effet préférentiellement orienté de gauche à droite.

Pour identifier les facteurs impliqués dans l'émergence de l'effet SPoARC au cours de la scolarité, l'Expérience 6 et l'Expérience 7 ont tenté d'établir un lien entre la spatialisation et le niveau de langage écrit, ainsi qu'avec la capacité en mémoire de travail verbale des participants. Tandis qu'une relation entre le SPoARC et le niveau de lecture et d'écriture a difficilement pu être mise en évidence dans nos résultats, un lien avec la capacité en mémoire a toutefois pu être observé : les participants présentant une plus faible capacité verbale étaient également ceux qui recrutaient davantage une spatialisation de l'ordre sériel. Les résultats de ce chapitre ont ainsi permis d'enrichir la littérature, en apportant des indications substantielles quant à l'émergence d'une spatialisation en mémoire de travail chez l'enfant sous des conditions expérimentales similaires à l'adulte. Dès le milieu de l'école élémentaire, l'enfant tend à organiser mentalement une série d'informations verbales le long d'un axe horizontal gauche-droite, sans que cette spatialisation ne soit facilitée par la présence de repères visuels durant la tâche. Les études de ce chapitre interrogent également le rôle fonctionnel que pourrait revêtir un tel encodage spatial pour la mémorisation, la spatialisation pouvant être préférentiellement recrutée par l'enfant dans le but de compenser ses difficultés sur

le plan mnésique ; bien que nos résultats demeurent encore limités pour trancher en faveur de cette interprétation.

Un **dernier volet expérimental** a enfin examiné l'évolution du SPoARC au cours de l'apprentissage répété d'une information sérielle. L'objectif de ce dernier volet était triple : il visait premièrement à examiner si le phénomène relève d'un effet général ou fonctionnel, sous l'hypothèse que les associations spatio-positionnelles observées en mémoire de travail s'estomperaient à mesure qu'une information sérielle devient familière pour le système cognitif. Un deuxième objectif était de déterminer si un protocole répété pouvait constituer une piste méthodologique favorable à l'optimisation de la détection du SPoARC chez l'enfant, sous l'hypothèse que la répétition d'une même séquence favoriserait le renforcement temporaire du lien entre les items et leurs coordonnées spatiales sur la ligne mentale. Ce dernier volet a enfin examiné à titre exploratoire si la spatialisation pouvait être associée à de meilleures capacités d'apprentissage, sous l'hypothèse qu'un enrichissement spatial de l'information contribuerait à l'élaboration de traces mnésiques plus stables en mémoire à long terme. Ces trois questions ont été examinées par le biais d'études menées respectivement chez l'adulte (Expérience 8) et chez l'enfant de CM2 (Expériences 9 et 10), lesquelles ont conduit à des résultats divergents en fonction du stade développemental investigué.

Des résultats en accord avec la majorité de nos prédictions ont été observés chez des participants adultes, qui servaient de point de référence pour nos échantillons d'enfants. Dans l'Expérience 8, une spatialisation de l'information sérielle a été repérée lors des premiers essais, suivie d'une disparition de l'effet au fil de la consolidation. Un lien significatif entre l'effet SPoARC observé en début de tâche et l'apprentissage immédiat de la séquence a également pu être relevé dans cette étude. Les adultes ayant spatialisé l'information préférentiellement de la gauche vers la droite dans les premiers essais présentaient également une diminution plus marquée de leur temps de réponse au fil de la consolidation, bien qu'un tel avantage n'ait pu être transposé à des performances de rappel différé. Des résultats plus nuancés ont été observés dans nos études menées chez l'enfant. À longueur de séquence comparable à l'adulte (quatre items), aucun SPoARC significatif n'a pu être observé lors des premières répétitions, un résultat que nous avons attribué dans la discussion de ce chapitre à une possible hétérogénéité dans les stratégies de segmentation adoptées lors de l'apprentissage sériel. Pour de plus courtes séquences (deux items), nos résultats ont néanmoins permis d'esquisser une trajectoire partiellement conforme à celle attendue dans nos hypothèses, en mettant en évidence une tendance à une spatialisation au cours de la répétition, suivie de sa disparition. En revanche, l'observation d'un effet plus saillant également suivi d'une disparition du SPoARC dans une condition non-répétée ne permet pas à ce jour de statuer clairement en faveur de nos prédictions : en l'état, la disparition du SPoARC ne semble pas exclusive à la consolidation d'une information sérielle familière chez

l'enfant. L'utilisation d'un protocole répété chez cette population ne semble pas non plus favoriser l'expression d'un effet saillant en début d'apprentissage. Le lien entre spatialisation et apprentissage identifié chez l'adulte n'a également pas pu être répliqué dans nos études chez l'enfant, bien que des résultats descriptifs laissent envisager qu'un lien puisse être plus favorablement repéré par le biais de protocoles plus robustes que nous avons suggérés lors de notre discussion.

En définitive, cette thèse a permis de compléter et d'enrichir les recherches antérieures ayant cherché à décrire le phénomène de spatialisation en mémoire de travail sur une large tranche d'âge. Sur le plan méthodologique, nos travaux ont permis de dégager trois pistes expérimentales permettant de mesurer le traitement spatial de l'information ordinale *i)* sous un angle pratique et minimaliste utilisant une information unique, *ii)* dans sa forme canonique, par la mesure de multiples temps de réponse et *iii)* au cours de la consolidation mnésique, en manipulant la répétition de l'information ; des protocoles que nous avons éprouvés tant chez l'adulte que chez l'enfant. En identifiant les conditions expérimentales favorisant ou limitant l'émergence de l'effet dans ces deux populations, nous pensons que nos travaux apportent finalement des éclairages sur la genèse et la trajectoire de ce phénomène, sur les facteurs qui sous-tendent son émergence et questionnent sur sa possible contribution au fonctionnement mnésique. La partie suivante offrira une synthèse et une ouverture des éléments discutés dans les précédents chapitres, avant d'aborder les pistes expérimentales futures pouvant être dégagées des travaux menés dans cette thèse.

5.2 Apports, limites et ouvertures

5.2.1 Développement de la spatialisation de l'ordre sériel

Biais spatial élémentaire Les résultats apportés dans cette thèse ont permis de compléter la littérature sur le développement de biais spatiaux élémentaires liés au traitement de l'ordre sériel. Chez l'animal, une spatialisation de l'ordre sériel préférentiellement orientée de gauche à droite tend à être observée (Drucker & Brannon, 2014 ; Rugani et al., 2010). Cette spatialisation innée de l'information ordinale s'observe également chez l'être humain dans sa première année de vie (de Hevia et al., 2014b ; West & McCrink, 2021). Selon la littérature, ce biais connaît ensuite une période d'agnosticisme spatial entre deux et trois ans (McCrink et al., 2017 ; McCrink & de Hevia, 2018 ; West & McCrink, 2021), témoignant de l'extinction d'un biais rigide (i.e., déterminé par une dominance hémisphérique droite, voir Rugani et al., 2016, 2025) au profit d'un encodage plus flexible des stimulations multi-directionnelles issues de l'environnement. À mesure que le jeune enfant accumule des expériences congruentes avec une

orientation donnée, un biais spatial de nature culturelle prend la relève du biais inné, conduisant à une nouvelle forme de spatialisation de l'ordre sériel (en l'occurrence, une spatialisation orientée de gauche à droite dans la culture occidentale que nous avons étudiée dans cette thèse).

En montrant qu'une spatialisation élémentaire de l'ordre sériel s'observe à l'âge de quatre ans, nos résultats corroborent le stade de réémergence précédemment identifié par West et McCrink (2021). Comme discuté dans le Chapitre 2, nos résultats permettent également de nuancer les conclusions de leur étude. Notre protocole de translation (visant à limiter la rotation mentale du matériel lors de la phase de transposition) a permis d'identifier une tendance à la spatialisation chez l'enfant de cinq ans, ainsi qu'un effet robuste à la correction statistique chez l'adulte, deux stades développementaux pour lesquels West et McCrink (2021) n'avaient pas pu identifier de biais spatial (en utilisant une transposition basée sur une occlusion). Ces différences dans l'apparition de l'effet entre nos deux protocoles mettent en évidence l'influence de facteurs méthodologiques dans l'expression spontanée d'un biais spatial gauche-droite. Dans cette thèse, nous soulignons par exemple l'impact de la rotation mentale potentiellement mobilisée dans des tâches de transposition spatiale, en particulier lorsque l'encodage est réalisé en l'absence de tout label pouvant aider l'individu à ancrer sa stratégie sur des représentations ordinales stockées en mémoire à long terme.

Sous réserve des ajustements méthodologiques développés ultérieurement, nous proposons que le protocole de translation développé dans cette thèse puisse constituer une approche pertinente pour *i)* préciser la trajectoire de biais spatiaux élémentaires au cours du développement, et *ii)* renseigner si ces biais sont réellement précurseurs d'une spatialisation plus complexe en mémoire de travail. Notre protocole pourrait premièrement être éprouvé plus amplement chez des enfants entre deux et trois ans, pour confirmer la période d'agnosticisme spatial identifiée par McCrink et al. (2017) et West et McCrink (2021). Comme discuté dans le Chapitre 2, la possibilité qu'un biais ait été plus difficilement détectable dans leurs tâches de transposition en raison de l'application d'une rotation mentale ne peut à ce jour être écartée, cette compétence cognitive pouvant être observée de manière précoce dans le développement (Beckner et al., 2023). Nous proposons également que le biais spatial détecté dans notre tâche de transposition puisse être directement corrélé à des mesures du SPoARC à un âge plus avancé. Une telle corrélation permettrait de tester de façon longitudinale la stabilité du phénomène à l'échelle individuelle, et de renseigner si la direction de la spatialisation mobilisée dans l'espace externe et dans l'espace interne tend à être congruente chez un même individu. Une telle perspective longitudinale pourrait également s'avérer pertinente pour établir si l'émergence précoce du biais gauche-droite élémentaire favorise l'expression d'un SPoARC dans le développement (i.e., montrant un style cognitif pour certains individus chez qui le phénomène se renforcerait avec l'âge), ou si d'autres

trajectoires plus surprenantes existent (e.g., des paliers dépendant de la maturation de la mémoire de travail, indépendamment du niveau scolaire, ou encore des périodes transitoires suivies d'extinctions à différents âges).

Associations spatio-positionnelles en mémoire de travail Cette thèse montre que dès l'âge de huit ans, l'enfant issu d'une culture occidentale tend à coder l'ordre d'une série d'informations verbales sur une ligne mentale orientée de gauche à droite, une spatialisation détectable dans les temps de réaction à une tâche de reconnaissance. Ce résultat constitue l'une des premières démonstrations que la spatialisation opère dans des conditions expérimentales similaires à l'adulte à cet âge. De manière éclairante, Moorkens et al. (2025) ont récemment identifié un SPoARC chez l'enfant d'âge scolaire par le biais d'un protocole également fondé sur la mesure de temps de réponse. Dans leur étude, des participants âgés de 8, 10, 13 et 15 ans ont réalisé une tâche de spatialisation impliquant la mémorisation de quatre dessins en noir et blanc, suivie d'une tâche de reconnaissance permettant la mesure de l'effet SPoARC. Dans leur phase de test, deux items (un leurre et une cible) étaient présentés du côté gauche et du côté droit de l'écran. Le participant devait identifier le plus rapidement possible l'item cible, en répondant de sa main gauche ou de sa main droite en fonction de l'emplacement de l'item à l'écran. Pour une même séquence, une série de seize sondes était présentée aux participants, qui devaient réaliser à l'issue de leurs seize réponses une phase de vérification de l'ordre sériel. Pour cette dernière étape, le participant devait indiquer quel item parmi deux avait été présenté en premier dans la séquence. Par le biais de cette manipulation expérimentale, Moorkens et al. (2025) ont montré une spatialisation significative au sein de tous les groupes d'âge, à l'exception des participants âgés de huit ans (scolarisés en troisième année d'école élémentaire dans leur étude).

En accord avec les résultats apportés dans cette thèse, Moorkens et al. (2025) confirment que l'effet SPoARC s'observe dès la scolarité élémentaire. Par ailleurs, cette thèse contribue à enrichir leurs travaux en apportant deux précisions au regard de la manifestation de l'effet SPoARC chez l'enfant. Premièrement, nous montrons qu'une spatialisation opère à l'âge de dix ans même lorsque le traitement de l'ordre des séquences n'est pas explicitement requis durant la tâche. À la différence de Moorkens et al. (2025), aucune phase de rappel de l'ordre n'était demandée aux participants dans l'ensemble de nos études. Cette distinction entre nos deux protocoles montre que l'enfant opère un traitement spatial *spontané* de l'ordre sériel, approchant le fonctionnement implicite déjà identifié chez l'adulte dans de nombreux travaux précédents (e.g., Fenwick et al., 2025 ; Guida et al., 2016, 2018a, 2018b, 2020c). Une deuxième différence concerne le stade d'émergence identifié dans nos études et dans celle de Moorkens et al. (2025). Alors que Moorkens et al. (2025) ont rapporté la présence d'un effet uniquement à partir de dix ans, nous montrons qu'un SPoARC est déjà détectable deux

ans plus tôt. Ces disparités dans la détection de l'effet chez l'enfant scolarisé en CE2 mettent davantage en lumière la vulnérabilité de la spatialisation à cet âge précis, une vulnérabilité que nous avions déjà pu esquisser en croisant les résultats de cette thèse. Il demeure par ailleurs incertain si un SPoARC n'a pas pu être détecté dans l'étude de Moorkens et al. (2025) principalement en raison d'une taille de séquence (i.e., quatre) trop coûteuse (aucun SPoARC n'ayant été détecté à quatre items chez les CE2 de l'Expérience 6), en raison de l'application d'une procédure Multi-cibles (pouvant conduire à des effets plus faibles chez l'adulte, comme montré dans l'Expérience 5) ou encore en raison d'un manque d'expertise en lecture chez les enfants de leur échantillon (comme suggéré par les résultats de l'Expérience 7).

Chez l'enfant plus âgé, le SPoARC semble s'appliquer de manière plus large à différentes manipulations expérimentales. De la même manière que l'adulte, l'effet s'observe tant dans une condition Mono-cible (Exp.6 et 10) que dans une condition Multi-cibles (Moorkens et al., 2025) ; aussi bien en présence (Moorkens et al., 2025) ou en absence (Exp.6 et 10) d'un rappel explicite de l'ordre sériel, ou encore sous diverses longueurs de séquences (Exp.6 et 10). Bien que ces observations pourraient dénoter des mécanismes de spatialisation comparables entre enfants de dix ans et adultes, les études menées dans le Chapitre 4 apportent une nuance à cette interprétation. Les disparités dans la trajectoire du SPoARC au cours d'une tâche non-répétée entre ces deux populations suggèrent par exemple que la spatialisation pourrait s'avérer plus résistante à l'interférence proactive chez l'adulte, là où l'effet apparaît plus instable chez l'enfant. Ces variations indiquent que le SPoARC se situe encore à un stade de maturité intermédiaire à l'issue de la scolarité élémentaire, mettant en lumière un développement graduel du phénomène au fil de l'âge. En particulier, l'âge de huit ans discuté dans le paragraphe précédent apparaît fatidique et devrait être visé dans de futures études pour mettre à jour plus finement la trajectoire développementale du phénomène.

Facteurs liés au développement du SPoARC Dans leur revue théorique, Guida et Campitelli (2019) proposaient que le SPoARC résulte d'une expertise dans le langage écrit, en expliquant qu'un entraînement intensif à cette activité permettrait le développement d'une structure de connaissance en mémoire à long terme (i.e., une ligne mentale avec des slots). Une fois cette structure développée, elle serait spontanément recrutée en mémoire de travail pour faciliter le codage de l'ordre sériel. Chaque item d'une séquence serait associé à un slot au sein de la ligne mentale, en suivant l'orientation gauche-droite conditionnée par ces mêmes activités de lecture et d'écriture. Comme discuté dans le Chapitre 3, deux résultats issus de nos travaux pourraient conforter l'hypothèse de l'expertise dans le langage écrit. Le premier résultat concerne le stade d'émergence de l'effet identifié dans nos études, qui correspond à un niveau scolaire où la lecture et l'écriture tendent à s'automatiser. Nos comparaisons entre les

échantillons de CE2 de l'Expérience 6 et de l'Expérience 7 ont également montré un niveau significativement supérieur d'exactitude en lecture dans l'échantillon pour lequel un SPoARC a pu être détecté à l'échelle du groupe, et ce même après contrôle de l'âge. Un tel résultat pourrait indiquer que ce niveau scolaire constitue un stade charnière dans l'émergence du SPoARC principalement en raison de l'automatisation de la lecture. Cependant, cette interprétation doit être envisagée avec précaution, car les tâches utilisées auprès des deux échantillons différaient légèrement sur un plan méthodologique, ayant pu influencer la manifestation de l'effet. De futures études sont en ce sens nécessaires pour éprouver davantage la validité de nos résultats, et préciser si le passage à un mode de lecture expert au cours de la troisième année de l'école élémentaire favorise l'émergence d'associations spatio-positionnelles gauche-droite en mémoire de travail. De telles études pourraient par exemple s'appuyer sur des batteries plus larges d'évaluation du langage écrit (e.g., lecture de texte, lecture isolée de mots réguliers et irréguliers ou de pseudo-mots), et cibler des cohortes plus conséquentes pour mieux capturer d'éventuelles variations inter-individuelles, tant dans le niveau de lecture que dans la manifestation du SPoARC. Le lien entre le SPoARC et la lecture pourrait être également apprécié par une approche plus qualitative. Sur le plan de l'exactitude par exemple, il aurait pu être pertinent de distinguer les participants en fonction de la nature des erreurs commises lors de la tâche de lecture (une telle analyse qualitative n'a pas pu être réalisée dans le cadre de cette thèse, le type d'erreur n'ayant pas été systématiquement reporté lors de la cotation). Un autre fait concerne les jalons des niveaux scolaires ciblés dans le cadre de nos études, qui excluaient les élèves scolarisés en CE1. En considérant que ce niveau scolaire se situe à un stade intermédiaire entre absence et présence du SPoARC à l'échelle du groupe, l'exploration du lien entre SPoARC et lecture à ce moment du développement pourrait se révéler informative à cet âge en particulier. De futures études pourraient également corroborer l'absence de lien entre écriture et spatialisation montrée dans nos résultats, suggérant que l'automatisation de cette activité ne constitue pas un facteur déterminant dans la variation du SPoARC.

Un autre résultat concerne le lien entre capacité mnésique et spatialisation identifié dans les études de cette thèse. Nos études montrent qu'une plus faible capacité mnésique était préférentiellement observée chez des enfants spatialisant davantage l'information en mémoire de travail. Comme discuté dans le Chapitre 3, un tel résultat pourrait illustrer une tendance chez l'enfant à mobiliser la spatialisation pour compenser ses difficultés mnésiques, sans que ce mécanisme ne soit encore suffisamment mature pour améliorer ses performances. Un tel résultat diffère de ceux observés chez l'adulte, qui reportent un lien positif entre spatialisation et capacité, indiquant que les individus plus performants sur le plan mnésique tendent également à davantage faire usage de marqueurs spatiaux pour coder l'information (Tian & Fischer-Baum, 2025 ; van Dijck

et al., 2022). Cependant, il convient de noter que les tâches sur lesquelles spatialiseurs et non spatialiseurs se distinguent à l'âge adulte correspondent – pour la mémoire verbale – à des tâches liées préférentiellement au traitement de l'ordre sériel. Dans nos études, la seule tâche pouvant préférentiellement apprécier l'efficience de ce mécanisme correspond à la tâche d'empan mnésique en ordre envers, pour laquelle des mesures restaient manquantes pour environ un tiers des participants. En ce sens, nous proposons que nos résultats méritent une réplication, pour mieux renseigner si la spatialisation, comme chez l'adulte, pourrait être corrélée à l'empan envers chez l'enfant. Nos résultats méritent également d'être complétés en favorisant des mesures pouvant explicitement distinguer la capacité liée à la mémorisation de l'item et à la mémorisation de l'ordre sériel (e.g., Attout et al., 2014 ; Attout & Majerus, 2015 ; Leclercq & Majerus, 2010 ; Majerus et al., 2006b ; Majerus & Boukebza, 2013), comme proposé dans l'étude de Tian et Fischer-Baum (2025) dans le cadre du SPoARC. Cette meilleure distinction pourrait permettre de révéler que la spatialisation chez l'enfant bénéficie effectivement, comme chez l'adulte, au traitement à court terme de l'ordre sériel.

5.2.2 Spatialisation et apprentissage répété

L'examen du SPoARC dans le contexte d'un apprentissage répété a permis de mettre en évidence la disparition de la spatialisation au cours de la consolidation, en particulier dans notre étude réalisée chez l'adulte. Dans cette expérience, nos résultats ont montré un SPoARC significatif au cours des huit premières répétitions d'une même séquence, tandis que l'effet n'était plus observable par la suite. Un tel résultat suggère que l'utilisation de marqueurs spatiaux pour coder l'ordre d'une séquence tend à décliner à mesure que la représentation de la série se stabilise en mémoire, une trajectoire que nous avons interprétée comme résultant de la formation d'un chunk lors de l'apprentissage. Par ailleurs, si un chunk peut préserver certaines informations perceptuelles ou contextuelles propres aux éléments qu'il regroupe (Allen et al., 2021), la spatialisation pourrait également être préservée sur le long terme. En ce sens, nous suggérons que si la spatialisation s'est atténuée dans nos résultats, cette trajectoire ne devrait pas être généralisée à tout type d'information en mémoire à long terme, dans la mesure où la littérature suggère qu'un chunk pourrait aussi être spatial. Cette idée peut être retrouvée dans la théorie de l'expertise de Guida et Campitelli (2019), notamment en ce qui concerne les hypothèses avancées par les auteurs pour rendre compte de l'effet SNARC. Comme présenté dans le Cadre Théorique de cette thèse, les auteurs proposaient que le traitement répété de séries constamment présentées dans un ordre similaire (e.g., la séquence 1 à 9, la série A à Z) résulterait en la formation de schémas sans slots (autrement dit, des chunks fixes), qui seraient stockés en mémoire à long terme. Ces représentations à long terme conserveraient la valeur spatiale associée aux

stimuli, déduite des régularités observées dans l'environnement (la série 1 à 9 étant, par exemple, fréquemment présentée de gauche à droite dans une culture occidentale). Ces représentations spatiales résulteraient alors en des effets de type SNARC (montrant par exemple une association entre de petits chiffres et l'espace gauche et une association entre de grands chiffres et l'espace droit, voir Dehaene et al., 1993). Selon Guida et Campitelli (2019), un chunk stocké en mémoire à long terme pourrait ainsi conserver des coordonnées spatiales distinctes.

Néanmoins, dans notre manipulation expérimentale, les chunks putatifs formés par les participants pourraient être d'une autre nature. En effet, les effets de type SNARC sont pensés comme résultant d'une exposition répétée à des séries *physiquement* présentées de gauche à droite dans l'environnement (par exemple, sur des règles graduées, des frises ou des graphiques dans le cas de la série 1 à 9). Les coordonnées spatiales assignées à chaque élément stocké en mémoire à long terme dérivent donc d'une information spatiale directement prodiguée par l'environnement physique dans lequel l'individu évolue (Guida & Campitelli, 2019). À l'inverse, les informations répétées présentées dans notre protocole ne comportaient aucune dimension spatiale explicite, les items étant présentés de manière centrale, et la suite mémorisée ne se rapportant à aucun chunk préexistant susceptible de déclencher un effet SNARC. Nous postulons donc que les coordonnées spatiales initialement assignées à la séquence répétée ont émergé directement en mémoire de travail, et que ces associations spatio-positionnelles demeurent hautement flexibles. Les marqueurs spatiaux pourraient ainsi être réajustés à mesure que la série se consolide et que les items se regroupent en une seule unité au cours de l'apprentissage, formant ainsi un chunk dont les éléments ne sont plus distinctement spatialisés. Pour ces raisons, nous pensons que nos résultats contribuent à éclairer la manière dont la spatialisation est respectivement impliquée dans les effets SNARC et SPoARC, qui pourraient effectivement résulter de mécanismes distincts comme proposé par différents auteurs (e.g., Ginsburg et al., 2014 ; Ginsburg & Gevers, 2015 ; Guida & Campitelli, 2019 ; Hartmann et al., 2021 ; Huber et al., 2016). La différenciation entre ces deux effets est également plus largement appuyée par la chronologie d'apparition du SPoARC mise en évidence dans les études du Chapitre 3 : là où des effets SNARC similaires à l'adulte sont visibles dès l'âge préscolaire (e.g., Hoffmann et al., 2013 ; Ramos et al., 2026), nos études tendent à confirmer que l'effet SPoARC tel que mis en évidence chez l'adulte n'est détectable qu'à un stade beaucoup plus avancé du développement. Ce stade d'apparition plus tardif semble indiquer que l'effet SPoARC repose sur un encodage spatial plus complexe et flexible que celui sous-tendant le SNARC, une différence déjà anticipée par la théorie de l'expertise de Guida et Campitelli (2019).

Pour en revenir aux études proposées pour examiner l'évolution du SPoARC au cours de l'apprentissage, il convient ici de noter différentes limites qui mériteraient

d'être prises en compte pour préciser nos résultats. La première limite qu'il convient de discuter concerne le manque d'éléments pouvant attester que les participants ont effectivement chunké l'information au cours de la tâche. De ce fait, différentes manipulations expérimentales pourraient permettre de mieux éprouver notre interprétation fondée sur le chunking. Comme proposé dans la Discussion intermédiaire du Chapitre 4, des études futures pourraient par exemple manipuler explicitement la manière dont les stimuli sont regroupés en proposant des clusters visuels ou temporels lors de la phase d'encodage. Une autre manière de mieux renseigner si l'information répétée fait l'objet d'un regroupement spatial au cours de l'apprentissage serait d'ajouter une information supplémentaire à l'issue de la consolidation. Cette nouvelle tâche débuterait de la même manière que les études présentées dans cette thèse : les items 1, 2, 3 et 4 seraient présentés de manière répétée, et nous devrions observer – en accord avec les résultats obtenus chez l'adulte – une spatialisation initiale de ces items suivie d'une disparition de l'effet SPoARC dans les répétitions suivantes. Une seconde phase consisterait à compléter la séquence répétée par de nouveaux items, en proposant par exemple aux participants de mémoriser la série 1-2-3-4-5-6-7-8. Par le biais de cette manipulation expérimentale, il serait alors possible de tester si la série consolidée dans la première phase serait effectivement regroupée sous un unique marqueur spatial, et si la mémoire de travail assignerait des marqueurs spatiaux distinctifs à la nouvelle information sérielle.

En second lieu, il convient d'admettre que le découpage en bloc proposé dans notre protocole reste une approche assez rudimentaire pour apprécier la variation de l'effet SPoARC au cours de la consolidation. Pour rappel, nos contrebalancements prévoyaient un découpage en blocs de 16 répétitions chacun, bien qu'une analyse par sous-blocs de huit essais a pu être réalisée à titre exploratoire dans nos trois études. Nous pensons néanmoins que l'étude du SPoARC à une échelle temporelle encore plus restreinte permettrait d'évaluer plus finement la trajectoire du phénomène. De manière critique, la réintroduction d'une procédure multi-cibles pourrait s'avérer pertinente pour mieux répondre à cet objectif. Pour cause, cette procédure implique de sonder la mémoire à différentes reprises pour une même séquence, en présentant par exemple tous les items de la série mémorisée ainsi qu'un nombre équivalent de leurres (comme dans notre Expérience 5), ou même possiblement en répétant chaque cible et chaque leurre à deux reprises (e.g., Ginsburg et al., 2017 ; Hartmann et al., 2021 ; van Dijck & Fias, 2011). Cette procédure pourrait s'avérer cruciale pour accroître le nombre de temps de réponse recueillis pour chaque main et chaque position au cours de la tâche, et ainsi permettre une estimation plus robuste de l'effet sous des découpages plus restreints. Ainsi, si nos études (réalisées en condition mono-cible) estimaient le SPoARC par le biais de seulement deux temps de réponse par position et par main pour chaque participant sur l'ensemble des 16 répétitions, une quantité de données comparable pourrait être obtenue avec une à deux répétitions seulement dans une procédure multi-cibles. L'utilisation

d'une telle méthode pourrait permettre de renseigner plus précisément et plus fidèlement le stade auquel la spatialisation tend à décliner. De manière critique, une telle méthode pourrait permettre de mieux tenir compte des différences inter-individuelles dans la variation du SPoARC au cours de la consolidation. Des études récentes sur l'effet Hebb montrent en effet que la progression graduelle des performances observée à l'échelle du groupe masque en réalité des trajectoire individuelles caractérisées par un pic d'apprentissage survenant à des moments distincts selon l'individu (Musfeld et al., 2023). En obtenant une estimation plus robuste de l'effet SPoARC à l'échelle de l'essai, la spatialisation pourrait ainsi être plus favorablement mise en correspondance avec ces patterns d'apprentissage individuels (en permettant par exemple de disposer d'un nombre adéquat de données pour un découpage avant/après fondé sur un seuil d'apprentissage propre à chaque participant, y compris si ce seuil était visible dès les premières répétitions pour un individu donné).

5.3 Perspectives

5.3.1 Optimisation de la détection de la spatialisation chez l'enfant

Plusieurs pistes expérimentales peuvent être envisagées afin d'enrichir les protocoles mis en œuvre dans cette thèse pour examiner le développement du SPoARC. Comme proposé dans le Chapitre 4, de futures études pourraient faire usage d'un paradigme hybride (composé à la fois de séquences répétées et non-répétées) pour favoriser une stabilisation temporaire des associations spatio-positionnelles en mémoire. Nous proposions également qu'un protocole basé sur des ensembles ouverts d'items puisse plus favorablement conduire à la détection d'un effet SPoARC chez l'enfant, en réduisant l'interférence proactive causée par l'encodage des mêmes items à des positions différentes au cours de l'expérience. Par ailleurs, une autre piste pouvant être proposée consiste à favoriser un traitement explicite de l'ordre sériel durant la tâche de spatialisation. Mesurer le SPoARC chez l'enfant en présence de ce traitement explicite ne constituait pas un objectif central au sein de nos études, dans la mesure où nous souhaitions renseigner l'émergence d'un effet le plus similaire possible à celui observé chez l'adulte (i.e., un phénomène spontané de codage spatial de l'ordre en mémoire, si possible dans une situation où l'ordre lui-même serait encodé de façon spontanée). Une raison pour étudier le phénomène sous cet angle spontané est que, dans le cas contraire où nous aurions observé une spatialisation consécutive à une rétention de l'ordre imposé par la tâche elle-même, une interprétation possible des résultats aurait été que la

spatialisation n'a lieu que dans le cas où l'ordre de l'information doit être encodé, laissant un doute sur la présence de l'effet dans un contexte moins contraint. Cependant, il convient d'admettre que la proposition d'une tâche engageant un traitement explicite de l'ordre sériel pourrait contribuer à mesurer des effets plus robustes chez l'enfant, sous l'hypothèse que la spatialisation serait recrutée pour favoriser ce processus. Une grande majorité des études sur le SPoARC ont par exemple fait usage d'une phase de vérification de l'ordre à l'issue de la phase de reconnaissance ou de catégorisation sémantique mesurant la spatialisation (e.g. Bottini et al., 2016 ; Ginsburg et al., 2017 ; Guida et al., 2018b ; Hartmann et al., 2021 ; van Dijck & Fias, 2011 ; van Dijck et al., 2013, 2014, 2022 ; Zhou et al., 2020). Bien qu'une telle étape de vérification de l'ordre ne soit pas nécessaire pour que l'effet soit détectable (Guida et al., 2016, 2018a, 2020a, 2020c), elle pourrait présenter l'avantage d'assurer le maintien de l'ordre sériel tout au long du test critique. Néanmoins, la facilitation de l'effet dans ce contexte n'apparaît pas si évidente : dans une méta-analyse récente, Guida et al. (2025) ont tenté d'examiner la variation du SPoARC en fonction de la présence ou non de cette phase de vérification de l'ordre durant la tâche. Les auteurs n'ont néanmoins pas pu distinguer ce facteur d'un autre critère méthodologique (i.e., le nombre de sondes mémorisées par les participants), ne permettant pas de statuer sur l'aspect décisif de cette étape dans la détection de l'effet. Par ailleurs, un autre critère potentiellement plus décisif dans la manifestation du SPoARC a été identifié par Guida et al. (2025). Dans leur méta-analyse, la pente moyenne de spatialisation s'avérait plus marquée dans des tâches ayant mesuré l'effet sur la base d'un jugement temporel (les participants devant par exemple identifier si un item cible était apparu avant ou après un item médian). Une telle manipulation expérimentale pourrait ainsi s'avérer prometteuse pour de futures études destinées à l'enfant, ce type de protocole impliquant qu'un traitement explicite de l'ordre soit réalisé au moment même de la mesure des temps de réponse.

Des pistes peuvent également être proposées pour renforcer le protocole développé dans le Chapitre 2, qui a difficilement montré un biais spatial élémentaire régulier au fil de l'âge. Une première piste concerne la direction de l'encodage adoptée lors de la phase d'entraînement. Dans nos trois premières études, l'axe placé devant les participants était disposé de manière sagittale. De manière critique, l'encodage séquentiel effectué sur cet axe était réalisé du proximal vers le distal, une direction cohérente avec le SPoARC sagittal récemment identifié chez l'adulte (Attout et al., 2025). Cependant, rappelons que la tâche animée utilisée dans notre quatrième étude impliquait un axe disposé à la verticale (la tâche étant visionnée sur un écran d'ordinateur placé face aux participants). Au moment de l'entraînement, les boîtes étaient séquentiellement parcourues en allant du bas vers le haut, en accord avec la procédure utilisée par West et McCrink (2021). Bien que cette direction soit congruente avec les biais spatiaux observés dans le cadre du SNARC (voir Cooney et al., 2021, pour une étude chez l'enfant ;

et Bourgaux et al., 2023 ; Hachmann et al., 2014 ; Shaki & Fischer, 2018 ; Sixtus et al., 2019, pour des études chez l'adulte), il convient de noter qu'une direction opposée tend à être observée pour le SPoARC. Sur un axe vertical, les éléments associés à la première position sont préférentiellement codés vers le haut et les derniers éléments vers le bas (Hartmann et al., 2021). Ainsi, il peut être proposé que la direction adoptée lors de la phase d'entraînement aurait pu interférer avec un biais spatial vertical préférentiellement orienté de haut en bas, une interférence qui aurait pu impacter le biais spatial subséquemment adopté en modalité horizontale (voir West & McCrink, 2021, pour une discussion similaire). Cette proposition demeure spéculative, étant donné qu'un SPoARC vertical n'a jamais été examiné chez l'enfant à notre connaissance. L'éventuelle adoption de cette direction préférentielle dans notre tâche pourrait néanmoins être testée en inversant la procédure appliquée jusqu'à présent (i.e., en mesurant le sens adopté pour retrouver une position sérielle sur l'axe vertical après avoir encodé cette position sur l'axe horizontal).

Une autre limite concernant ce protocole est que la mesure d'un biais spatial n'a été effectuée que par le biais d'un seul test critique. L'inconvénient associé à cette unique mesure est qu'elle peut contenir une part d'aléatoire, les enfants pouvant répondre au hasard en raison du caractère inattendu de la transposition. Cette unique mesure pourrait donc contribuer à rejeter – ou attribuer – à tort l'existence d'un biais spatial gauche-droite pour un participant. Une manière d'attester la robustesse du biais à l'échelle individuelle pourrait être de multiplier les essais pour évaluer la consistance des réponses du participant. Un tel protocole impliquerait l'encodage d'une position donnée lors de la phase d'entraînement, suivie d'une phase de test ne prodiguant aucun feedback. La même procédure pourrait alors être répétée pour différentes positions, permettant d'évaluer si l'enfant adopte un biais spatial gauche-droite de manière systématique pour retrouver l'item cible en modalité horizontale. Cette approche quantitative pourrait contribuer à révéler que le biais spatial tend à suivre une trajectoire continue à partir de quatre ans, là où nos études suggèrent que l'effet fluctue au cours du développement. Une étude exploratoire basée sur des mesures répétées est par ailleurs en cours pour vérifier la faisabilité d'un tel protocole. Pour finir, nous proposons que la tâche de translation développée dans cette thèse puisse être transposée à des mesures plus implicites, basées par exemple sur des temps de réaction. Une telle manipulation pourrait impliquer la détection répétée d'un item présenté à une même position pendant la phase d'encodage en modalité verticale. Cette phase d'entraînement serait suivie d'un test de détection appliquée à l'axe horizontal, permettant de comparer la rapidité des réponses lorsque l'item apparaît dans une position congruente ou inverse à une organisation gauche-droite. De telles manipulations pourraient permettre d'approcher davantage les protocoles utilisés dans le cadre du SPoARC (i.e., différents essais pour un même participant et mesure de temps de réaction), tout en conservant le caractère

simplifié basé sur l'allègement de la charge mnésique.

5.3.2 Étude du lien entre spatialisation et apprentissage

Plusieurs pistes expérimentales pourraient être dégagées afin de permettre d'identifier plus favorablement un lien positif entre spatialisation et apprentissage sériel. Dans la Discussion intermédiaire du Chapitre 4, il était souligné qu'une comparaison des performances de rappel de la série répétée à différents intervalles (heures, jours ou semaines) pourrait révéler plus clairement les effets liés à l'application ou non d'une spatialisation au début de l'apprentissage. Il est néanmoins possible que des mesures plus implicites de la consolidation puissent également mieux capturer le bénéfice d'un traitement spatial initial de l'information mémorisée. Différentes études ayant investigué l'apprentissage hebbien ont par exemple montré que, lorsque des participants exécutent une tâche de décision lexicale après une tâche de type Hebb, des séries de syllabes dénuées de sens (par exemple, *la-va-bu*) pouvaient interférer avec des informations lexicales stockées en mémoire à long terme lorsque ces séries avaient préalablement fait l'objet d'une répétition (Szmalec et al., 2009, 2012). De tels résultats ont permis d'appuyer l'idée que des tâches mesurant l'apprentissage de type Hebb constituent un analogue expérimental à l'acquisition de nouveaux mots (Page & Norris, 2008, 2009). En s'inspirant de ces études, il peut être proposé qu'une épreuve de décision lexicale puisse être réalisée à l'issue d'une tâche de spatialisation. Dans cette tâche putative, des séries de syllabes seraient encodées de manière répétée, permettant la mesure du SPoARC au fil de la consolidation. Une telle démarche expérimentale permettrait par ailleurs d'introduire un contexte plus écologique pour l'apprentissage, en raison de la nature lexicale des unités à mémoriser (là où nos séries d'images de fruits auraient pu être moins naturellement consolidées par les participants). Par la suite, il serait possible de comparer les performances à la tâche de décision lexicale entre les participants ayant fait usage ou non de marqueurs spatiaux pour coder les unités sous-lexicales au premier stade de l'apprentissage sériel. Sous l'hypothèse d'un bénéfice lié à la spatialisation des séquences, il serait alors attendu que les séries spatialisées génèrent davantage d'interférence lexicale que des séries non spatialisées, traduisant une empreinte mnésique plus marquée. Autrement dit, des participants spatialiseurs pourraient présenter des temps de réponse plus longs lors de la décision lexicale effectuée sur des séries ayant été répétées lors de la tâche préalable, témoignant d'une meilleure consolidation de l'information en comparaison à des non-spatialiseurs. Par le biais de cette manipulation expérimentale, de futurs travaux pourraient ainsi examiner si la spatialisation peut intervenir aux premiers stades de l'acquisition de nouvelles formes de mots, et si le phénomène facilite la consolidation des sous-éléments lexicaux en une représentation lexicale unifiée.

Nous proposons enfin que cette question puisse être abordée dans le champ de la psychologie cognitive clinique, et plus particulièrement dans le cadre de l'étude des troubles neuro-développementaux. La littérature montre par exemple que des personnes présentant une dyslexie pourraient rencontrer à la fois des difficultés dans l'apprentissage par répétition de type Hebb (e.g., Szmalec et al., 2011) et dans la mémorisation de l'ordre sériel (e.g., Cowan et al., 2017 ; Hachmann et al., 2014 ; Martinez-Perez et al., 2012 ; pour une revue, voir Majerus & Cowan, 2016). En émettant l'hypothèse que la spatialisation puisse soutenir le traitement de l'ordre lors des premiers stades de l'apprentissage lexical, il serait alors légitime de se demander si les difficultés observées chez les personnes dyslexiques pourraient être liées à un déficit de mobilisation de la spatialisation en mémoire de travail ; une hypothèse appuyée par le fait que des atteintes visuo-spatiales sont susceptibles de contribuer à la dyslexie développementale (e.g., Bosse et al., 2007 ; Valdois et al., 2003 ; Valdois et al., 2019). Ainsi, le lien entre associations spatio-positionnelles et apprentissage sériel pourrait faire l'objet de travaux futurs portant sur une population dyslexique, pour ouvrir la voie à de nouvelles pistes de remédiation axées sur la spatialisation. Comme proposé par Majerus (2023, p.39, voir aussi Majerus et Poncelet, 2017, pp.4-5), ces approches pourraient reposer sur un entraînement fondé sur un ancrage visuo-spatial de l'information sérielle au cours de l'apprentissage de séquences, une intervention ayant déjà montré son efficacité chez des individus porteurs d'un syndrome de Down, également impactés dans la mémorisation de l'ordre sériel (voir Smith, 2015, cité par Majerus, 2023). L'entraînement à spatialiser explicitement l'information lors de l'apprentissage pourrait favoriser l'intégration mentale de cette stratégie et l'application plus générale d'un traitement spatial de l'information sérielle en mémoire de travail, dans l'éventualité où ce mécanisme serait effectivement altéré chez certains individus.

5.4 Conclusion

Cette thèse a exploré la spatialisation en mémoire de travail au cours du développement, en appliquant deux types de protocoles expérimentaux : premièrement, en utilisant des tâches simples de transposition spatiale d'un élément, adaptables aux enfants dès l'âge préscolaire, et deuxièmement, en utilisant des tâches plus complexes recourant à la mesure de temps de réaction à plusieurs éléments mémorisés, plus adaptées aux enfants d'âge scolaire. Dans ces protocoles respectifs, les participants devaient mémoriser des informations ordinales qui n'étaient ni étiquetées ni verbalisées de façon alphanumérique dans la tâche simple, ou sans facilitation visuelle ni consigne explicite de rappeler les séquences dans leur ordre initial dans la tâche complexe. Selon nos résultats, une forme élémentaire de spatialisation gauche-droite lors de la récupération d'une position sur un axe horizontal tangible est apparue vers l'âge de quatre ans, et une forme plus complexe de spatialisation lors de la mémorisation de différents items a pu être détectée dans des tâches plus longues deux ans après le début de l'école élémentaire. Bien que de manière variable jusqu'à dix ans, l'observation du phénomène sur cette large tranche d'âge a permis de mettre en évidence l'influence précoce de facteurs culturels sur l'encodage de l'ordre sériel. Chez les enfants scolarisés en école primaire, la spatialisation semble dépendre des caractéristiques de la mémoire de travail verbale, suggérant qu'elle pourrait compenser certaines limites mnésiques. Les tâches d'apprentissage répétées ont montré, par ailleurs, que les adultes tendent à spatialiser l'information en début de tâche – cet effet diminuant avec la consolidation des séquences répétées – tandis que chez les enfants, le phénomène semble plus fluctuant en fonction de la répétition des séquences. Globalement, ces résultats tendent à clarifier la trajectoire développementale de la spatialisation et permettent d'entrevoir une meilleure compréhension du fonctionnement de la mémoire et de l'apprentissage. Enfin, cette thèse propose des approches méthodologiques diverses pour étudier le traitement spatial des informations ordinales à différents âges, offrant des perspectives pour la recherche future sur la mémorisation de l'ordre des informations à court et à long terme. Cependant, pour pallier les limites de cette thèse, de futures études pourraient manipuler le rappel explicite des informations ordinales (afin de mieux décrire la trajectoire développementale du phénomène et de mieux déterminer ses mécanismes fonctionnels), le mélange d'informations répétées et non-répétées (afin de mieux identifier la temporalité du phénomène), ainsi que les directions horizontales, verticales et sagittales (que ce soit pour l'information présentée ou pour la disposition des touches de réponse, afin de mieux caractériser les effets culturels).

Références

Abrahamse, E., Van Dijck, J.-P., Majerus, S., & Fias, W. (2014). Finding the answer in space : The mental whiteboard hypothesis on serial order in working memory. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*(932), 1-12. https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00932

Abrahamse, E., van Dijck, J.-P., & Fias, W. (2016). How does working memory enable number-induced spatial biases ? *Frontiers in Psychology*, *7*(977), 1-11. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00977

Abrahamse, E., van Dijck, J.-P., & Fias, W. (2017). Grounding verbal working memory : The case of serial order. *Current Directions in Psychological Science*, *26*(5), 429-433. https://doi.org/10.1177/0963721417704404

Abrahamse, E., & Guida, A. (2018). Commentary : Coding of serial order in verbal, visual and spatial working memory. *Frontiers in Psychology*, *9*(2330), 1-3. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02330

Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE transactions on automatic control*, *19*(6), 716-723.

Aleotti, S., Di Girolamo, F., Massaccesi, S., & Priftis, K. (2020). Numbers around Descartes : A preregistered study on the three-dimensional SNARC effect. *Cognition*, *195*, 104111. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2019.104111

Alin, A. (2010). Multicollinearity. *Wiley interdisciplinary reviews : computational statistics*, *2*(3), 370-374.

Alloway, T. P., & Alloway, R. G. (2010). Investigating the predictive roles of working memory and IQ in academic attainment. *Journal of experimental child psychology*, *106*(1), 20-29. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2009.11.003

Allen, M. G., Destefano, I., & Brady, T. F. (2021). Chunks are not "Content-Free" : Hierarchical Representations Preserve Perceptual Detail within Chunks. *Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, *43*(43).

Allison, P. (2012). When can you safely ignore multicollinearity. *Statistical horizons*, *5*(1), 1-2.

Annis, J., Malmberg, K., Criss, A., & Shiffrin, R. (2013). Sources of interference in recognition testing. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, *39*(5), 1365-1376. doi:%2010.1037/a0032188

Antoine, S., Ranzini, M., Gebuis, T., van Dijck, J.-P., & Gevers, W. (2017). Order information in verbal working memory shifts the subjective midpoint in both

the line bisection and the landmark tasks. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *70*(10), 1973-1983. http://dx.doi.org/10.1080/17470218.2016.1217246

Araya, C., Oberauer, K., & Saito, S. (2022). The Hebb repetition effect in complex span tasks : Evidence for a shared learning mechanism with simple span tasks. *Memory & Cognition*, *50*(5), 925-940.

Araya, C., Oberauer, K., & Saito, S. (2024). Hebb repetition effects in complex and simple span tasks are based on the same learning mechanism. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, *50*(5), 759.

Attout, L., Noël, M.-P., & Majerus, S. (2014). The relationship between working memory for serial order and numerical development : A longitudinal study. *Developmental psychology*, *50*(6), 1667-1679. https://doi.org/10.1037/a0036496

Attout, L., & Majerus, S. (2015). Working memory deficits in developmental dyscalculia : The importance of serial order. *Child Neuropsychology*, *21*(4), 432-450. https://doi.org/10.1080/09297049.2014.922170

Attout, L., & Monnier, C. (2023). Evidence of a positive effect of verbal cumulative rehearsal on serial order working memory, as early as 4 years old. *Developmental Psychology*, *59*(10), 1771. https://doi.org/10.1037/dev0001621

Attout, L., Lefevre, S., & Charras, P. (2025). Mid-Sagittal Spatialization of Working Memory : A Spoarc Effect Beyond Cultural Directionality [SSRN Preprint]. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5399336

Bächtold, D., Baumüller, M., & Brugger, P. (1998). Stimulus-response compatibility in representational space. *Neuropsychologia*, *36*(8), 731-735.

Baddeley, A., & Hitch, G. (1974). Working memory. In G. Bower (Éd.), *Recent advances in learning and motivation* (p. 647-667). Academic Press.

Baddeley, A. (2003). Working memory and language : An overview. *Journal of communication disorders*, *36*(3), 189-208. https://doi.org/10.1016/S0021-9924(03)00019-4

Baddeley, A. (2012). Working memory : Theories, models, and controversies. *Annual review of psychology*, *63*, 1-29. https://doi.org/10.1146/annurev-psych-120710-100422

Banks, E. (2022). Spatialization in Working Memory – The Optimization of Testing for the SPoARC Effect. [Rapport de stage non publié. Institut Neuromod. Université Côte d'Azur].

Barrouillet, P., Bernardin, S., & Camos, V. (2004). Time Constraints and Resource Sharing in Adults' Working Memory Spans. *Journal of Experimental Psychology : General*, *133*, 83-100. https://doi.org/10.1037/0096-3445.133.1.83

Beckner, A. G., Katz, M., Tompkins, D. N., Voss, A. T., Winebrake, D., LoBue, V., Oakes, L. M., & Casasola, M. (2023). A novel approach to assessing infant and child mental rotation. *Journal of Intelligence*, *11*(8), 168.

Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995). Controlling the false discovery rate : a practical and powerful approach to multiple testing. *Journal of the Royal statistical society : series B (Methodological)*, *57*(1), 289-300.

Berry, D. A. (1987). Logarithmic transformations in ANOVA. *Biometrics*, 439-456.

Boiteau, T., & Almor, A. (2017). Transitivity, space, and hand : The spatial grounding of syntax. *Cognitive Science*, *41*(4), 848-891. https://doi.org/10.1111/cogs.12355

Boiteau, T. (2015). *The syntax-space effect* [thèse de doct., University of South Carolina].

Bonin, P., Méot, A., Aubert, L.-F., Malardier, N., Niedenthal, P., & Capelle-Toczek, M.-C. (2003). Normes de concrétude, de valeur d'imagerie, de fréquence subjective et de valence émotionnelle pour 866 mots. *L'année Psychologique*, *103*(4), 655-694.

Bonin, P., Poulin-Charronnat, B., Lukowski Duplessy, H., Bard, P., Vinter, A., Ferrand, L., & Méot, A. (2020). IMABASE : A new set of 313 colourised line drawings standardised in French for name agreement, image agreement, conceptual familiarity, age-of-acquisition, and imageability. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *73*(11), 1862-1878. https://doi.org/10.1177/1747021820932822

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

Bottini, R., Mattioni, S., & Collignon, O. (2016). Early blindness alters the spatial organization of verbal working memory. *Cortex*, *83*, 271-279. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.08.007

Bourgaux, L., de Hevia, M.-D., & Charras, P. (2023). Spatio–Numerical Mapping in 3D. *Experimental Psychology*, *70*(1), 51-60. https://doi.org/10.1027/1618-3169/a000575

Bourdin, B. (2007). Du codage visuel au codage verbal : le rôle de l'apprentissage de la lecture. *Enfance*, *59*(2), 145-159. https://doi.org/10.3917/enf.592.0145

Bower, G. H. (1970). Analysis of a mnemonic device : Modern psychology uncovers the powerful components of an ancient system for improving memory. *American Scientist*, *58*(5), 496-510.

Bradshaw, J. L., & Bradshaw, J. A. (1988). Rotational and turning tendencies in humans : An analog of lateral biases in rats ? *International Journal of Neuroscience*, *39*(3-4), 229-232.

Brown, G., Preece, T., & Hulme, C. (2000). Oscillator-based memory for serial order. *Psychological Review*, *107*, 127-181.

Brown, G., Neath, I., & Chater, N. (2007). A temporal ratio model of memory. *Psychological Review*, *114*(3), 539-576. https://doi.org/10.1037/0033-295X.114.3.539

Brooks, J. L., Della Sala, S., & Darling, S. (2014). Representational pseudoneglect : A review. *Neuropsychology review*, *24*(2), 148-165. https://doi.org/10.1007/s11065-013-9245-2

Bulf, H., de Hevia, M.-D., & Macchi Cassia, V. (2016). Small on the left, large on the right : Numbers orient visual attention onto space in preverbal infants. *Developmental Science*, *19*(3), 394-401. https://doi.org/10.1111/desc.12315

Bulf, H., de Hevia, M. D., Gariboldi, V., & Macchi Cassia, V. (2017). Infants learn better from left to right : A directional bias in infants' sequence learning. *Scientific Reports*, *7*(1), 2437. https://doi.org/10.1038/s41598-017-02466-w

Bulf, H., Capparini, C., Nava, E., de Hevia, M. D., & Cassia, V. M. (2022). Space modulates cross-domain transfer of abstract rules in infants. *Journal of Experimental Child Psychology*, *213*, 105270. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2021.105270

Bulut, M., Roth, L., Bahreini, N., Cipora, K., Reips, U. D., & Nuerk, H.-C. (2025). One direction ? Cultural aspects of the mental number line beyond reading direction. *Psychological Research*, *89*(1), 37. https://doi.org/10.1007/s00426-024-02038-4

Burnham, K., & Anderson, D. (2004). Multimodel inference : Understanding AIC and BIC in model selection. *Sociological methods & research*, *33*(2), 261-304. https://doi.org/10.1177/0049124104268644

Burgess, N., & Hitch, G. J. (2006). A revised model of short-term memory and long-term learning of verbal sequences. *Journal of Memory and Language*, *55*(4), 627-652. https://doi.org/10.1016/j.jml.2006.08.005

Burnham, K., Anderson, D., & Huyvaert, K. (2011). AIC model selection and multimodel inference in behavioral ecology : some background, observations, and comparisons. *Behavioral ecology and sociobiology*, *65*(1), 23-35. https://doi.org/10.1007/s00265-010-1029-6

Burgess, N., & Hitch, G. (1999). Memory for Serial Order : A Network Model of the Phonological Loop and Its Timing. *Psychological Review*, *106*(3), 551-581. https://doi.org/10.1037/0033-295X.106.3.551

Camos, V., Lagner, P., & Barrouillet, P. (2009). Two maintenance mechanisms of verbal information in working memory. *Journal of Memory and Language*, *61*, 457-469.

Camos, V., Mora, G., & Oberauer, K. (2011). Adaptive choice between articulatory rehearsal and attentional refreshing in verbal working memory. *Memory & Cognition*, *39*(2), 231-244.

Camos, V. (2015). Storing verbal information in working memory. *Current Directions in Psychological Science*, *24*(6), 440-445. https://doi.org/10.1177/0963721415606630

Campitelli, G. (2015). Memory behavior requires knowledge structures, not memory stores. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01696

Canteaut, A. (2003). Programmation en langage C. *INRIA-projet CODES*.

Cavalli, E., Colé, P., Leloup, G., Poracchia-George, F., Sprenger-Charolles, L., & El Ahmadi, A. (2018). Screening for dyslexia in French-speaking university students : An evaluation of the detection accuracy of the Alouette test. *Journal of learning disabilities*, *51*(3), 268-282.

Charles, M., Soppelsa, R., & Albaret, J.-M. (2004). *BHK : échelle d'évaluation rapide de l'écriture*. les Éditions du Centre de psychologie appliquée.

Chase, W., & Ericsson, K. (1982). Skill and working memory. In G. Bower (Éd.), *Psychology of learning and motivation* (p. 1-58, T. 16). Elsevier. https://doi.org/10.1016/S0079-7421(08)60546-0

Cheng, Y.-L., & Mix, K. S. (2014). Spatial training improves children's mathematics ability. *Journal of cognition and development*, *15*(1), 2-11.

Chu, M., & Kita, S. (2011). The nature of gestures' beneficial role in spatial problem solving. *Journal of experimental psychology : General*, *140*(1), 102.

Cipora, K., van Dijck, J.-P., Georges, C., Masson, N., Goebel, S., Willmes, K., Pesenti, M., Schiltz, C., & Nuerk, H.-C. (2019). A Minority pulls the sample mean : on the individual prevalence of robust group-level cognitive phenomena-the instance of the SNARC effect [PsyArXiv Preprint]. https://doi.org/10.31234/osf.io/bwyr3

Clark, S., & Gronlund, S. (1996). Global matching models of recognition memory : How the models match the data. *Psychonomic bulletin & review*, *3*(1), 37-60. https://doi.org/10.3758/BF03210740

Conrad, R. (1960). Serial order intrusions in immediate memory. *British Journal of Psychology*, *51*(1), 45-48. https://doi.org/10.1111/j.2044-8295.1960.tb00723.x

Cooney, S. M., Holmes, C. A., & Newell, F. N. (2021). Children's spatial–numerical associations on horizontal, vertical, and sagittal axes. *Journal of Experimental Child Psychology*, *209*, 105169.

Cowan, N., Elliott, E. M., Saults, J. S., Morey, C. C., Mattox, S., Hismjatullina, A., & Conway, A. R. (2005). On the capacity of attention : Its estimation and its role in working memory and cognitive aptitudes. *Cognitive psychology*, *51*(1), 42-100.

Cowan, N., Hogan, T., Alt, M., Green, S., Cabbage, K., Brinkley, S., & Gray, S. (2017). Short-term memory in childhood dyslexia : Deficient serial order in multiple modalities. *Dyslexia*, *23*(3), 209-233. https://doi.org/10.1002/dys.1557

Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory : A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, *24*(1), 87-185. https://doi.org/10.1017/S0140525X01003922

Cowan, N. (2010). The Magical Mystery Four : How is Working Memory Capacity Limited, and Why ? *Current Directions in Psychological Science*, *19*, 51-57.

Criss, A., Malmberg, K., & Shiffrin, R. (2011). Output interference in recognition memory. *Journal of Memory and Language*, *64*(4), 316-326. https://doi.org/10.1016/j.jml.2011.02.003

Dale, R. H. (1987). Similarities between human and animal spatial memory : Item and order information. *Animal Learning & Behavior*, *15*(3), 293-300.

Daoud, J. I. (2017). Multicollinearity and regression analysis. *journal of physics : Conference series*, *949*(1), 012009.

Day, H., & Day, K. C. (1997). Directional preferences in the rotational play behaviors of young children. *Developmental Psychobiology : The Journal of the International Society for Developmental Psychobiology*, *30*(3), 213-223.

de Belder, M., Abrahamse, E., Kerckhof, M., Fias, W., & van Dijck, J.-P. (2015). Serial position markers in space : Visuospatial priming of serial order working memory retrieval. *PloS one*, *10*(1), 1-10. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0116469

De Vita, F., Schmidt, S., Tinti, C., & Re, A. M. (2021). The role of working memory on writing processes. *Frontiers in Psychology*, *12*, 738395. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.738395

Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of experimental psychology : General*, *122*(3), 371-396. https://doi.org/10.1037/0096-3445.122.3.371

DeMarie, D., & Ferron, J. (2003). Capacity, strategies, and metamemory : Tests of a three-factor model of memory development. *Journal of Experimental Child Psychology*, *84*(3), 167-193.

Demoulin, C., & Kolinsky, R. (2016). Does learning to read shape verbal working memory ? *Psychonomic bulletin & review*, *23*(3), 703-722. https://doi.org/10.3758/s13423-015-0956-7

Desrochers, A., & Thompson, G. L. (2009). Subjective frequency and imageability ratings for 3,600 French nouns. *Behavior research methods*, *41*(2), 546-557.

de Hevia, M.-D., & Spelke, E. S. (2010). Number-space mapping in human infants. *Psychological Science*, *21*(5), 653-660. https://doi.org/10.1177/0956797610366091

de Hevia, M. D., Girelli, L., & Macchi Cassia, V. (2012). Minds without language represent number through space : origins of the mental number line. *Frontiers in Psychology*, *3*, 1-4. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00466

de Hevia, M. D., Izard, V., Coubart, A., Spelke, E. S., & Streri, A. (2014a). Representations of space, time, and number in neonates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *111*(13), 4809-4813.

de Hevia, M.-D., Girelli, L., Addabbo, M., & Cassia, V.-M. (2014b). Human infants' preference for left-to-right oriented increasing numerical sequences. *PloS one*, *9*(5), 1-10. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0096412

de Hevia, M.-D., Veggiotti, L., Streri, A., & Bonn, C. (2017). At birth, humans associate "few" with left and "many" with right. *Current Biology*, *27*(24), 3879-3884. https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.11.024

de Hevia, M. D. (2021). How the human mind grounds numerical quantities on space. *Child Development Perspectives*, *15*(1), 44-50. https://doi.org/10.1111/cdep.12398

Di Giorgio, E., Lunghi, M., Rugani, R., Regolin, L., Dalla Barba, B., Vallortigara, G., & Simion, F. (2019). A mental number line in human newborns. *Developmental science*, *22*(6), 1-10. https://doi.org/10.1111/desc.12801

Drucker, C., & Brannon, E. (2014). Rhesus monkeys (Macaca mulatta) map number onto space. *Cognition*, *132*(1), 57-67. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2014.03.011

Ebbinghaus, H. (1885). *Über das gedächtnis : untersuchungen zur experimentellen psychologie*. Duncker & Humblot.

Ellis, N. (1990). Reading, phonological skills and short-term memory : interactive tributaries of development. *Journal of Research in Reading*, *13*(2), 107-122. https://doi.org/10.1111/j.1467-9817.1990.tb00328.x

Elman, J. L. (1993). Learning and development in neural networks : the importance of starting small. *Cognition*, *48*, 71-99.

Engelkamp, J., & Dehn, D. M. (2000). Item and order information in subject-performed tasks and experimenter-performed tasks. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, *26*(3), 671.

Ericsson, K. A., & Kintsch, W. (2000). Shortcomings of generic retrieval structures with slots of the type that Gobet (1993) proposed and modelled. *British Journal of Psychology*, *91*(4), 571-590.

Ericsson, K., & Kintsch, W. (1995). Long-term working memory. *Psychological review*, *102*(2), 211-245. https://doi.org/10.1037/0033-295X.102.2.211

Faul, F., Erdfelder, E., Buchner, A., & Lang, A.-G. (2009). Statistical power analyses using G* Power 3.1 : Tests for correlation and regression analyses. *Behavior research methods*, *41*(4), 1149-1160. https://doi.org/10.3758/BRM.41.4.1149

Fenwick, H., Campitelli, G., & Guida, A. (2025). Spatial organisation in the human mind as a function of the distance between stimuli. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *78*(6), 1107-1123. https://doi.org/10.1177/17470218241255690

Ferguson, B., Franconeri, S. L., & Waxman, S. R. (2018). Very young infants learn abstract rules in the visual modality. *PloS one*, *13*(1), e0190185. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190185

Fias, W., & van Dijck, J.-P. (2016). The temporary nature of number—space interactions. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*, *70*(1), 33-40. https://doi.org/10.1037/cep0000071

Fias, W., Brysbaert, M., Geypens, F., & d'Ydewalle, G. (1996). The Importance of Magnitude Information in Numerical Processing : Evidence from the SNARC Effect. *Mathematical cognition*, *2*(1), 95-110.

Fischer, M. H., & Brugger, P. (2011). When digits help digits : spatial–numerical associations point to finger counting as prime example of embodied cognition. *Frontiers in psychology*, *2*, 1-7. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00260

Fischer, M. H., & Shaki, S. (2014). Spatial associations in numerical cognition—From single digits to arithmetic. *Quarterly journal of experimental psychology*, *67*(8), 1461-1483.

Fischer, M. (2003). Spatial representations in number processing–evidence from a pointing task. *Visual cognition*, *10*(4), 493-508.

Fischer, M. H. (2008). Finger counting habits modulate spatial-numerical associations. *cortex*, *44*(4), 386-392. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2007.08.004

Fischer, J.-P. (2022). L'écriture en miroir des enfants : une histoire complète [Prépublication déposée sur HAL].

Ftaïta, M., Vivion, M., Banks, E., Guida, A., Ramanoël, S., Fartoukh, M., & Mathy, F. (2023). Optimized experimental designs to best detect spatial positional association of response codes in working memory. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *85*, 1661-1680. https://doi.org/10.3758/s13414-023-02666-9

Ftaïta, M., Guida, A., Fartoukh, M., & Mathy, F. (2024). Spatial–positional associations in short-term memory can vanish in long-term memory. *Memory & Cognition*, *52*, 2073-2091. https://doi.org/10.3758/s13421-024-01577-w

Galton, F. (1880). Visualised numerals. *Nature*, *21*(533), 252-256.

Gathercole, S. E., Alloway, T. P., Willis, C., & Adams, A.-M. (2006). Working memory in children with reading disabilities. *Journal of experimental child psychology*, *93*(3), 265-281. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2005.08.003

Gathercole, S. E., Adams, A.-M., & Hitch, G. J. (1994). Do young children rehearse ? An individual-differences analysis. *Memory & cognition*, *22*(2), 201-207.

Gathercole, S. E. (1998). The development of memory. *The Journal of Child Psychology and Psychiatry and Allied Disciplines*, *39*(1), 3-27.

Georges, C., Cornu, V., & Schiltz, C. (2019). Spatial skills first : The importance of mental rotation for arithmetic skill acquisition. *Journal of Numerical Cognition*, *5*(1), 5-23.

Gevers, W., Reynvoet, B., & Fias, W. (2003). The mental representation of ordinal sequences is spatially organized. *Cognition*, *87*(3), B87-B95. https://doi.org/10.1016/S0010-0277(02)00234-2

Gevers, W., Reynvoet, B., & Fias, W. (2004). The mental representation of ordinal sequences is spatially organised : Evidence from days of the week. *Cortex*, *40*(1), 171-172. https://doi.org/10.1016/S0010-9452(08)70938-9

Ginsburg, V., van Dijck, J.-P., Previtali, P., Fias, W., & Gevers, W. (2014). The impact of verbal working memory on number–space associations. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, *40*(4), 976-986. https://doi.org/10.1037/a0036378

Ginsburg, V., & Gevers, W. (2015). Spatial coding of ordinal information in short-and long-term memory. *Frontiers in human neuroscience*, *9*(8), 1-10. https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00008

Ginsburg, V., Archambeau, K., van Dijck, J.-P., Chetail, F., & Gevers, W. (2017). Coding of serial order in verbal, visual and spatial working memory. *Journal of Experimental Psychology : General*, *146*(5), 632-650. https://doi.org/10.1037/xge0000278

Giurfa, M., Marcout, C., Hilpert, P., Thevenot, C., & Rugani, R. (2022). An insect brain organizes numbers on a left-to-right mental number line. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *119*(44), 1-8. https://doi.org/10.1073/pnas.2203584119

Gobet, F., Lane, P. C., Croker, S., Cheng, P. C.-H., Jones, G., Oliver, I., & Pine, J. M. (2001). Chunking mechanisms in human learning. *Trends in Cognitive Sciences*, *5*, 236-243.

Gobet, F., Lane, P. C., & Lloyd-Kelly, M. (2015). Chunks, schemata, and retrieval structures : Past and current computational models. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01785

Göbel, S. M., McCrink, K., Fischer, M. H., & Shaki, S. (2018). Observation of directional storybook reading influences young children's counting direction. *Journal of Experimental Child Psychology*, *166*, 49-66. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2017.08.001

Gobet, F., & Simon, H. (1996). Templates in chess memory : A mechanism for recalling several boards. *Cognitive psychology*, *31*(1), 1-40. https://doi.org/10.1006/cogp.1996.0011

Gobet, F. (2000a). Retrieval structures and schemata : A brief reply to Ericsson and Kintsch. *British Journal of Psychology*, *91*(4), 591-594.

Gobet, F. (2000b). Some shortcomings of long-term working memory. *British Journal of Psychology*, *91*(4), 551-570.

Goffin, C., Vogel, S., Slipenkyj, M., & Ansari, D. (2020). A comes before B, like 1 comes before 2. Is the parietal cortex sensitive to ordinal relationships in both numbers and letters ? An fMRI-adaptation study. *Human brain mapping*, *41*(6), 1591-1610. https://doi.org/10.1002/hbm.24897

Gordon, H. W., Busdiecker, E. C., & Bracha, H. S. (1992). The relationship between leftward turning bias and visuospatial ability in humans. *International journal of neuroscience*, *65*(1-4), 29-36.

Gospe Jr, S. M., Mora, B. J., & Glick, S. D. (1990). Measurement of spontaneous rotational movement (circling) in normal children. *Journal of child neurology*, *5*(1), 31-34.

Guida, A., Gobet, F., Tardieu, H., & Nicolas, S. (2012). How chunks, long-term working memory and templates offer a cognitive explanation for neuroimaging data on expertise acquisition : a two-stage framework. *Brain and cognition*, *79*, 221-244.

Guida, A., Gras, D., Noel, Y., Le Bohec, O., Quaireau, C., & Nicolas, S. (2013). The effect of long-term working memory through personalization applied to free recall : Uncurbing the primacy-effect enthusiasm. *Memory & Cognition*, *41*(4), 571-587. https://doi.org/10.3758/s13421-012-0284-3

Guida, A., & Lavielle-Guida, M. (2014). 2011 space odyssey : Spatialization as a mechanism to code order allows a close encounter between memory expertise and classic immediate memory studies. *Frontiers in psychology*, *5*(573), 1-5. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00573

Guida, A., Leroux, A., Lavielle-Guida, M., & Noël, Y. (2016). A SPoARC in the dark : Spatialization in verbal immediate memory. *Cognitive Science*, *40*(8), 2108-2121. https://doi.org/10.1111/cogs.12316

Guida, A., Carnet, S., Normandon, M., & Lavielle-Guida, M. (2018a). Can spatialisation be extended to episodic memory and open sets ? *Memory*, *26*(7), 922-935. https://doi.org/10.1080/09658211.2018.1428350

Guida, A., Megreya, A. M., Lavielle-Guida, M., Noël, Y., Mathy, F., van Dijck, J.-P., & Abrahamse, E. (2018b). Spatialization in working memory is related to literacy and reading direction : Culture "literarily" directs our thoughts. *Cognition*, *175*, 96-100. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2018.02.013

Guida, A., & Campitelli, G. (2019). Explaining the SPoARC and SNARC effects with knowledge structures : An expertise account. *Psychonomic bulletin & review*, *26*(2), 434-451. https://doi.org/10.3758/s13423-019-01582-0

Guida, A., Abrahamse, E., & van Dijck, J.-P. (2020a). About the interplay between internal and external spatial codes in the mind : Implications for serial order. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1477*(1), 20-33. https://doi.org/10.1111/nyas.14341

Guida, A., Fartoukh, M., & Mathy, F. (2020b). The development of working memory spatialization revealed by using the cave paradigm in a two-alternative spatial choice. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1477*(1), 54-70. https://doi.org/10.1111/nyas.14433

Guida, A., Mosinski, F., Cipora, K., Mathy, F., & Noël, Y. (2020c). Spatialization in working memory : Can individuals reverse the cultural direction of their thoughts ? *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1477*(1), 113-125. https://doi.org/10.1111/nyas.14499

Guida, A., & Porret, A. (2022). A SPoARC of Music : Musicians Spatialize Melodies but not All-Comers. *Cognitive Science*, *46*(5), 1-15. https://doi.org/10.1111/cogs.13139

Guida, A., Mathy, F., Gobet, F., Campitelli, G., & Sala, G. (2025). Linking space and ordinal position in working memory : A multi-level meta-analysis of the SPoARC effect. *Cognition*, *266*, 1-20. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2025.106276

Güneş, E., & Nalçaci, E. (2006). Directional preferences in turning behavior of girls and boys. *Perceptual and motor skills*, *102*(2), 352-357.

Gupta, P. (2003). Examining the relationship between word learning, nonword repetition, and immediate serial recall in adults. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, *56*(7), 1213-1236.

Haberlandt, K., Thomas, J. G., Lawrence, H., & Krohn, T. (2005). Transposition asymmetry in immediate serial recall. *Memory*, *13*(3-4), 274-282.

Hachmann, W. M., Bogaerts, L., Szmalec, A., Woumans, E., Duyck, W., & Job, R. (2014). Short-term memory for order but not for item information is impaired in developmental dyslexia. *Annals of dyslexia*, *64*(2), 121-136. https://doi.org/10.1007/s11881-013-0089-5

Hartmann, M., Grabherr, L., & Mast, F. W. (2012). Moving along the mental number line : Interactions between whole-body motion and numerical cognition. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, *38*(6), 1416. https://doi.org/10.1037/a0026706

Hartmann, M., Martarelli, C., & Sommer, N. (2021). Early is left and up : Saccadic responses reveal horizontal and vertical spatial associations of serial order in working memory. *Cognition*, *217*, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2021.104908

Heathcote, A. (2004). Fitting Wald and ex-Wald distributions to response time data : An example using functions for the S-PLUS package. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, *36*(4), 678-694.

Hebb, D. O. (1961). Distinctive features of learning in the higher animal. *Brain mechanisms and learning*, *37*, 46.

Henson, R., Hartley, T., Burgess, N., Hitch, G., & Flude, B. (2003). Selective interference with verbal short-term memory for serial order information : A new paradigm and tests of a timing-signal hypothesis. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, *56*(8), 1307-1334. https://doi.org/10.1080/02724980244000747

Henry, L. A., Messer, D., Luger-Klein, S., & Crane, L. (2012). Phonological, visual, and semantic coding strategies and children's short-term picture memory span. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *65*(10), 2033-2053. https://doi.org/10.1080/17470218.2012.672997

Henson, R. (2001). Serial order in short-term memory. *The Psychologist*, *14*(2), 70-73.

Henson, R. (1996). *Short-term memory for serial order* [thèse de doct., University of Cambridge].

Henson, R. (1998). Short-term memory for serial order : The Start-End Model. *Cognitive Psychology*, *36*(2), 73-137. https://doi.org/10.1006/cogp.1998.0685

Henson, R. (1999). Coding position in short-term memory. *International Journal of Psychology*, *34*(5-6), 403-409.

Herrera, A., Macizo, P., & Semenza, C. (2008). The role of working memory in the association between number magnitude and space. *Acta psychologica*, *128*(2), 225-237. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2008.01.002

Heurley, L. (2012). *Mémoire et perception : l'influence de la simulation de la couleur sur la perception de la couleur* [thèse de doct., Université Paul Valéry-Montpellier III].

Hitch, G. J., Fastame, M. C., & Flude, B. (2005). How is the serial order of a verbal sequence coded ? Some comparisons between models. *MEMORY*, *13*(3/4), 247-258.

Hoffmann, D., Hornung, C., Martin, R., & Schiltz, C. (2013). Developing number–space associations : SNARC effects using a color discrimination task in 5-year-olds. *Journal of Experimental Child Psychology*, *116*(4), 775-791. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2013.07.013

Hope, A. C. (1968). A simplified Monte Carlo significance test procedure. *Journal of the Royal Statistical Society Series B : Statistical Methodology*, *30*(3), 582-598.

Huang, L., & Awh, E. (2018). Chunking in working memory via content-free labels. *Scientific reports*, *8*(1), 23.

Huber, S., Klein, E., Moeller, K., & Willmes, K. (2016). Spatial–numerical and ordinal positional associations coexist in parallel. *Frontiers in psychology*, *7*(438), 1-13. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00438

Humphreys, M., Pike, R., Bain, J., & Tehan, G. (1989). Global matching : A comparison of the SAM, Minerva II, Matrix, and TODAM models. *Journal of Mathematical Psychology*, *33*(1), 36-67. https://doi.org/10.1016/0022-2496(89)90003-5

Hurlstone, M., Hitch, G., & Baddeley, A. (2014). Memory for serial order across domains : An overview of the literature and directions for future research. *Psychological Bulletin*, *140*(2), 339-373. https://doi.org/10.1037/a0034221

Hurlstone, M., & Hitch, G. (2018). How is the serial order of a visual sequence represented ? Insights from transposition latencies. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, *44*(2), 167-192. http://dx.doi.org/10.1037/xlm0000440

Inkscape Project. (2020, avril 16). *Inkscape* (Version 0.92.5). https://inkscape.org

James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). *An introduction to statistical learning : with applications in R* (T. 103). Springer.

Jansen, P., & Kellner, J. (2015). The role of rotational hand movements and general motor ability in children's mental rotation performance. *Frontiers in Psychology*, *6*, 984.

Johnstone, S. J., Dimoska, A., Smith, J. L., Barry, R. J., Pleffer, C. B., Chiswick, D., & Clarke, A. R. (2007). The development of stop-signal and Go/Nogo response inhibition in children aged 7–12 years : performance and event-related potential indices. *International Journal of Psychophysiology*, *63*(1), 25-38.

Johnson, S. P., Fernandes, K. J., Frank, M. C., Kirkham, N., Marcus, G., Rabagliati, H., & Slemmer, J. A. (2009). Abstract rule learning for visual sequences in 8-and 11-month-olds. *Infancy*, *14*(1), 2-18.

Jonkman, L. M. (2006). The development of preparation, conflict monitoring and inhibition from early childhood to young adulthood ; a Go/Nogo ERP study. *Brain research*, *1097*(1), 181-193.

Jones, G. (2012). Why chunking should be considered as an explanation for developmental change before short-term memory capacity and processing speed. *Frontiers in psychology*, *3*, 167.

Jordan, M. (1986). Serial Order, A Parallel Distributed Processing Approach. *Institute for Cognitive Science Report, 8604*, 1-37.

Kinsbourne, M. (1970). The cerebral basis of lateral asymmetries in attention. *Acta psychologica*, *33*, 193-201. https://doi.org/10.1016/0001-6918(70)90132-0

Kiyonaga, A., & Egner, T. (2013). Working memory as internal attention : Toward an integrative account of internal and external selection processes. *Psychonomic bulletin & review*, *20*(2), 228-242.

Kosslyn, S., Pinker, S., Smith, G., & Shwartz, S. (1979). On the demystification of mental imagery. *Behavioral and Brain Sciences*, *2*(4), 535-548. https://doi.org/10.1017/S0140525X00064268

Lacombe, N., & Dias, T. (2023). Développer les compétences de rotation mentale chez les élèves. Une revue systématique de littérature. *Revue de Mathématiques pour l'école*, (240), 29-45.

Lakens, D. (2013). Calculating and reporting effect sizes to facilitate cumulative science : a practical primer for t-tests and ANOVAs. *Frontiers in psychology*, *4*, 863.

Leclercq, A.-L., & Majerus, S. (2010). Serial-order short-term memory predicts vocabulary development : evidence from a longitudinal study. *Developmental psychology*, *46*(2), 417-427. https://doi.org/10.1037/a0018540

Lefavrais, P. (2005). Alouette-R. *Éditions du Centre de Psychologie Appliquée (ECPA). Paris.*

Lefavrais, P. (1967). Test de L'Alouette, Manuel et tests. *Éditions du Centre de Psychologie Appliquée (ECPA). Paris.*

Lenoir, M., Van Overschelde, S., De Rycke, M., & Musch, E. (2006). Intrinsic and extrinsic factors of turning preferences in humans. *Neuroscience letters*, *393*(2-3), 179-183.

Lewandowsky, S., & Farrell, S. (2008). Short-term memory : New data and a model. *Psychology of Learning and Motivation*, *49*, 1-48. https://doi.org/10.1016/S0079-7421(08)00001-7

Lewandowsky, S., Brown, G., & Thomas, J. (2009). Traveling economically through memory space : Characterizing output order in memory for serial order. *Memory & Cognition*, *37*, 181-193.

Lewandowsky, S., & Murdock, B. B. (1989). Memory for Serial Order. *Psychological Review*, *96*(1), 25-57. https://doi.org/10.1037/0033-295X.96.1.25

Libby, R., & Lipe, M. G. (1992). Incentives, effort, and the cognitive processes involved in accounting-related judgments. *Journal of Accounting Research*, *30*(2), 249-273.

Lindemann, O., Alipour, A., & Fischer, M. H. (2011). Finger counting habits in middle eastern and western individuals : an online survey. *Journal of Cross-Cultural Psychology*, *42*(4), 566-578.

Lo, S., & Andrews, S. (2015). To transform or not to transform : Using generalized linear mixed models to analyse reaction time data. *Frontiers in psychology*, *6*(1171), 1-16. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01171

Lorch, R. F., & Myers, J. L. (1990). Regression analyses of repeated measures data in cognitive research. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, *16*(1), 149.

Lumsden, J., Edwards, E. A., Lawrence, N. S., Coyle, D., & Munafò, M. R. (2016). Gamification of cognitive assessment and cognitive training : a systematic review of applications and efficacy. *JMIR serious games*, *4*(2), e5888.

Magro, L. O., Majerus, S., Attout, L., Poncelet, M., Smalle, E. H., & Szmalec, A. (2021). Do serial order short-term memory and long-term learning abilities predict spelling skills in school-age children ? *Cognition*, *206*, 104479. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2020.104479

Majerus, S., Poncelet, M., Elsen, B., & van der Linden, M. (2006a). Exploring the relationship between new word learning and short-term memory for serial order recall, item recall, and item recognition. *European Journal of Cognitive Psychology*, *18*, 848-873.

Majerus, S., Poncelet, M., Greffe, C., & Van der Linden, M. (2006b). Relations between vocabulary development and verbal short-term memory : The relative importance of short-term memory for serial order and item information. *Journal of experimental child psychology*, *93*(2), 95-119. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2005.07.005

Majerus, S., Poncelet, M., Van der Linden, M., & Weekes, B. S. (2008). Lexical learning in bilingual adults : The relative importance of short-term memory for serial order and phonological knowledge. *Cognition*, *107*(2), 395-419.

Majerus, S., Heiligenstein, L., Gautherot, N., Poncelet, M., & Van der Linden, M. (2009). Impact of auditory selective attention on verbal short-term memory and vocabulary development. *Journal of Experimental Child Psychology*, *103*, 66-86.

Majerus, S., & Boukebza, C. (2013). Short-term memory for serial order supports vocabulary development : New evidence from a novel word learning paradigm. *Journal of experimental child psychology*, *116*(4), 811-828. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2013.07.014

Majerus, S., & Cowan, N. (2016). The nature of verbal short-term impairment in dyslexia : The importance of serial order. *Frontiers in psychology*, *7*(1522), 1-8. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01522

Majerus, S., & Poncelet, M. (2017). Dyslexie et déficits de la mémoire à court terme/de travail : implications pour la remédiation. *ANAE : Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant*, *148*.

Majerus, S., & Oberauer, K. (2020). Working memory and serial order : Evidence against numerical order codes but for item–position associations. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, *46*(12), 2244. https://doi.org/10.1037/xlm0000792

Majerus, S. (2023). La mémoire de travail : un élément clé pour la compréhension et la remédiation des difficultés d'apprentissage. *Revue Suisse de Pédagogie Spécialisée*, *13*(04), 36-43. https://doi.org/10.57161/r2023-04-06

Manly, B. F. (2018). *Randomization, bootstrap and Monte Carlo methods in biology*. chapman ; hall/CRC.

Martinez-Perez, T., Majerus, S., Mahot, A., & Poncelet, M. (2012). Evidence for a specific impairment of serial order short-term memory in dyslexic children. *Dyslexia*, *18*(2), 94-109. https://doi.org/10.1002/dys.1438

Martarelli, C., Mast, F., & Hartmann, M. (2017). Time in the eye of the beholder : Gaze position reveals spatial-temporal associations during encoding and memory retrieval of future and past. *Memory & Cognition*, *45*(1), 40-48. https://doi.org/10.3758/s13421-016-0639-2

Marcoulides, K. M., & Raykov, T. (2019). Evaluation of variance inflation factors in regression models using latent variable modeling methods. *Educational and psychological measurement*, *79*(5), 874-882.

Marshuetz, C. (2005). Order information in working memory : an integrative review of evidence from brain and behavior. *Psychological bulletin*, *131*(3), 323-339. https://doi.org/10.1037/0033-2909.131.3.323

Mathy, F., & Feldman, J. (2012). What's magic about magic numbers ? Chunking and data compression in short-term memory. *Cognition*, *122*, 346-362.

Mathy, F., Fartoukh, M., Gauvrit, N., & Guida, A. (2016). Developmental abilities to form chunks in immediate memory and its non-relationship to span development. *Frontiers in psychology*, *7*, 201.

Mathy, F., Fartoukh, M., Gauvrit, N., & Guida, A. (2020). Children's working memory develops at similar rates for sequences differing in compressibility. *L'année Psychologique*, *120*, 175-202. https://doi.org/10.3917/anpsy1.202.0175.

McCrink, K., Shaki, S., & Berkowitz, T. (2014). Culturally driven biases in preschoolers' spatial search strategies for ordinal and non-ordinal dimensions. *Cognitive development*, *30*, 1-14. https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2013.11.002

McCrink, K., & Shaki, S. (2016). Culturally inconsistent spatial structure reduces learning. *Acta psychologica*, *169*, 20-26.

McCrink, K., Perez, J., & Baruch, E. (2017). Number prompts left-to-right spatial mapping in toddlerhood. *Developmental psychology*, *53*(7), 1256-1264. https://doi.org/10.1037/dev0000342

McCrink, K., Caldera, C., & Shaki, S. (2018). The early construction of spatial attention : Culture, space, and gesture in parent–child interactions. *Child Development*, *89*(4), 1141-1156.

McCrink, K., & de Hevia, M.-D. (2018). From innate spatial biases to enculturated spatial cognition : The case of spatial associations in number and other sequences. *Frontiers in psychology*, *9*(415), 1-4. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00415

McCrink, K., Veggiotti, L., & de Hevia, M. D. (2020). A left visual advantage for quantity processing in neonates. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1477*(1), 71-78.

McCabe, J. A. (2015). Location, location, location ! Demonstrating the mnemonic benefit of the method of loci. *Teaching of Psychology*, *42*(2), 169-173.

Miller, S., McCulloch, S., & Jarrold, C. (2015). The development of memory maintenance strategies : Training cumulative rehearsal and interactive imagery in

children aged between 5 and 9. *Frontiers in psychology*, *6*, 524. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00524

Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two : Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, *63*(2), 81-97. https://doi.org/10.1037/h0043158

Ministère de l'Éducation nationale. (2020). Programme de français du cycle 2 [Accédé le 11 avril 2025]. https://www.education.gouv.fr/media/70279/download

Ministère de l'Éducation nationale. (2023). Programme de français du cycle 3 [Accédé le 11 avril 2025]. https://eduscol.education.fr/document/50990/download

Ministère de l'Éducation nationale. (2024). Programme de français du cycle 1 [Accédé le 11 avril 2025]. https://www.education.gouv.fr/media/194196/download

Mızrak, E., & Oberauer, K. (2022). Working memory recruits long-term memory when it is beneficial : Evidence from the Hebb effect. *Journal of Experimental Psychology : General*, *151*(4), 763.

Mohr, C., Landis, T., Bracha, H., & Brugger, P. (2003). Opposite turning behavior in right-handers and non-right-handers suggests a link between handedness and cerebral dopamine asymmetries. *Behavioral neuroscience*, *117*(6), 1448.

Mohr, C., Brugger, P., Bracha, H. S., Landis, T., & Viaud-Delmon, I. (2004). Human side preferences in three different whole-body movement tasks. *Behavioural brain research*, *151*(1-2), 321-326.

Moorkens, J., Vonck, J., Cipora, K., van Dijck, J.-P., & Fias, W. (2025). The mental number line and the working memory line : Their relationship investigated throughout the school years. *Advances in Cognitive Psychology*, *21*(2), 176-188. https://doi.org/10.5709/acp-0455-3

Mora, G., & Camos, V. (2015). Dissociating rehearsal and refreshing in the maintenance of verbal information in 8-year-old children. *Front. Psychol.*, *6*.

Musfeld, P., Souza, A. S., & Oberauer, K. (2023). Repetition learning is neither a continuous nor an implicit process. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *120*(16), e2218042120.

Musfeld, P., Dutli, J., Oberauer, K., & Bartsch, L. M. (2024). Grouping in working memory guides chunk formation in long-term memory : Evidence from the Hebb effect. *Cognition*, *248*, 105795.

Nevo, E., & Breznitz, Z. (2011). Assessment of working memory components at 6 years of age as predictors of reading achievements a year later. *Journal of experimental child psychology*, *109*(1), 73-90. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.09.010

Nevo, E., & Breznitz, Z. (2013). The development of working memory from kindergarten to first grade in children with different decoding skills. *Journal of experimental child psychology*, *114*(2), 217-228. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2012.09.004

Nevo, E., & Bar-Kochva, I. (2015). The relations between early working memory abilities and later developing reading skills : A longitudinal study from kindergarten to fifth grade. *Mind, Brain, and Education*, *9*(3), 154-163. https://doi.org/10.1111/mbe.12084

New, B., Pallier, C., Brysbaert, M., & Ferrand, L. (2004). Lexique 2 : A new French lexical database. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, *36*(3), 516-524. https://doi.org/10.3758/BF03195598

Newport, E. L. (1990). Maturational constraints on language learning. *Cognitive science*, *14*(1), 11-28.

Norris, D., Page, M. P., & Hall, J. (2018). Learning nonwords : The Hebb repetition effect as a model of word learning. *Memory*, *26*(6), 852-857.

Oberauer, K., & Lewandowsky, S. (2011). Modeling working memory : A computational implementation of the Time-Based Resource-Sharing theory. *Psychonomic Bulletin & Review*, *18*, 10-45.

Oberauer, K. (2005). Binding and inhibition in working memory : Individual and age differences in short-term recognition. *Journal of experimental psychology : General*, *134*(3), 368-387. https://doi.rog/10.1037/0096-3445.134.3.368

Oftinger, A.-L., & Camos, V. (2018). Developmental improvement in strategies to maintain verbal information in working memory. *International Journal of Behavioral Development*, *42*(2), 182-191.

Oldfield, R. (1971). Edinburgh handedness inventory. *Journal of Abnormal Psychology*.

Opfer, J., Thompson, C., & Furlong, E. (2010). Early development of spatial-numeric associations : Evidence from spatial and quantitative performance of preschoolers. *Developmental Science*, *13*(5), 761-771. https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2009.00934.x

Ottem, E. J., Lian, A., & Karlsen, P. J. (2007). Reasons for the growth of traditional memory span across age. *European Journal of Cognitive Psychology*, (19), 233-270.

Padmala, S., & Pessoa, L. (2011). Reward reduces conflict by enhancing attentional control and biasing visual cortical processing. *Journal of cognitive neuroscience*, *23*(11), 3419-3432.

Page, M., & Norris, D. (2008). Is there a common mechanism underlying word-form learning and the Hebb repetition effect ? Experimental data and a modelling framework. In *Interactions between short-term and long-term memory in the verbal domain* (p. 148-168). Psychology Press.

Page, M., & Norris, D. (2009). A model linking immediate serial recall, the Hebb repetition effect and the learning of phonological word forms. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, *364*(1536), 3737-3753.

Page, M. P., Cumming, N., Norris, D., McNeil, A. M., & Hitch, G. J. (2013). Repetition-spacing and item-overlap effects in the Hebb repetition task. *Journal of Memory and Language*, *69*(4), 506-526.

Palmer, S. (2000a). Development of phonological recoding and literacy acquisition : A four-year cross-sequential study. *British Journal of Developmental Psychology*, *18*(4), 533-555. https://doi.org/10.1348/026151000165841

Palmer, S. (2000b). Phonological recoding deficit in working memory of dyslexic teenagers. *Journal of Research in reading*, *23*(1), 28-40. https://doi.org/10.1111/1467-9817.00100

Papadatou-Pastou, M., Ntolka, E., Schmitz, J., Martin, M., Munafò, M. R., Ocklenburg, S., & Paracchini, S. (2020). Human handedness : A meta-analysis. *Psychological bulletin*, *146*(6), 481.

Peirce, J., Gray, J., Simpson, S., MacAskill, M., Höchenberger, R., Sogo, H., Kastman, E., & Lindeløv, J. (2019). PsychoPy2 : Experiments in behavior made easy. *Behavior Research Methods*, *51*(1), 195-203. https://doi.org/10.3758/s13428-018-01193-y

Perez, T. M., Majerus, S., & Poncelet, M. (2012). The contribution of short-term memory for serial order to early reading acquisition : Evidence from a longitudinal study. *Journal of Experimental Child Psychology*, *111*(4), 708-723. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2011.11.007

Pitt, M., & Myung, I. J. (2002). When a good fit can be bad. *Trends in cognitive sciences*, *6*(10), 421-425. https://doi.org/10.1016/S1364-6613(02)01964-2

Poirier, M., Saint-Aubin, J., Mair, A., Tehan, G., & Tolan, A. (2015). Order recall in verbal short-term memory : The role of semantic networks. *Memory & Cognition*, *43*, 489-499. https://doi.org/10.3758/s13421-014-0470-6

Portrat, S., Guida, A., Phénix, T., & Lemaire, B. (2016). Promoting the experimental dialogue between working memory and chunking : Behavioral data and simulation. *Memory & Cognition*, *44*(3), 420-434.

Posner, M. I., Snyder, C. R., & Davidson, B. J. (1980). Attention and the detection of signals. *Journal of experimental psychology : General*, *109*(2), 160-174. https://doi.org/10.1037/0096-3445.109.2.160

Previtali, P., de Hevia, M.-D., & Girelli, L. (2010). Placing order in space : The SNARC effect in serial learning. *Experimental Brain Research*, *201*(3), 599-605. https://doi.org/10.1007/s00221-009-2063-3

Previc, F. H., & Saucedo, J. C. (1992). The relationship between turning behavior and motoric dominance in humans. *Perceptual and motor skills*, *75*(3), 935-944.

Proctor, R. W., & Cho, Y. S. (2006). Polarity correspondence : A general principle for performance of speeded binary classification tasks. *Psychological bulletin*, *132*(3), 416-432. https://doi.org/10.1037/0033-2909.132.3.416

R Core Team. (2023). *R : A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. https://www.R-project.org/

Ramos, T., Georges, C., & Schiltz, C. (2023). Do preschool children use spatial coding for serial order in working memory : a replication study. *6th Annual Conference of the Mathematical Cognition and Learning Society*.

Ramos, T., Georges, C., & Schiltz, C. (2026). Early development of spatial-numerical associations : consistency and variability of the SNARC effect in kindergarten children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *262*, 106393. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2025.106393

Rasoulzadeh, V., Sahan, M. I., van Dijck, J.-P., Abrahamse, E., Marzecova, A., Verguts, T., & Fias, W. (2021). Spatial attention in serial order working memory : An EEG study. *Cerebral Cortex*, *31*(5), 2482-2493. https://doi.org/10.1093/cercor/bhaa368

Rasoulzadeh, V., van Dijck, J.-P., Khosrowabadi, R., & Fias, W. (2024). Reading direction interacts with spatial processes of temporal order verbal working memory : evidence from Iranian right-to-left readers. *Language, Cognition and Neuroscience*, *39*(8), 1072-1089. https://doi.org/10.1080/23273798.2024.2370046

Ratcliff, R. (1993). Methods for dealing with reaction time outliers. *Psychological bulletin*, *114*(3), 510-532. https://doi.org/10.1037/0033-2909.114.3.510

Reifman, A., & Keyton, K. (2010). Winsorize. In N. Salkind (Éd.), *Encyclopedia of Research Design* (p. 1636-1638). Sage. https://doi.org/10.4135/9781412961288

Rinaldi, L., Brugger, P., Bockisch, C. J., Bertolini, G., & Girelli, L. (2015). Keeping an eye on serial order : Ocular movements bind space and time. *Cognition*, *142*, 291-298. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2015.05.022

Rivest, L.-P. (1994). Statistical properties of Winsorized means for skewed distributions. *Biometrika*, *81*(2), 373-383. https://doi.org/10.1093/biomet/81.2.373

Roediger, H., & Karpicke, J. (2006). Test-enhanced learning : Taking memory tests improves long-term retention. *Psychological science*, *17*(3), 249-255. https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2006.01693.x

Rohr, R. R. (1996). Sundials : history, theory, and practice. *New York : Dover Publications*.

Rosen, G. D., Galaburda, A. M., & Sherman, G. F. (1987). Mechanisms of brain asymmetry : new evidence and hypotheses. In *Duality and Unity of the Brain : Unified Functioning and Specialisation of the Hemispheres* (p. 29-36). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-1949-8_3

Rouder, J., Morey, R., Morey, C., & Cowan, N. (2011). How to measure working memory capacity in the change detection paradigm. *Psychonomic bulletin & review*, *18*, 324-330. https://doi.org/10.3758/s13423-011-0055-3

Rugani, R., Regolin, L., & Vallortigara, G. (2007). Rudimental numerical competence in 5-day-old domestic chicks (Gallus gallus) : identification of ordinal position. *Journal of Experimental Psychology : Animal Behavior Processes*, *33*(1), 21.

Rugani, R., Kelly, D. M., Szelest, I., Regolin, L., & Vallortigara, G. (2010). Is it only humans that count from left to right ? *Biology Letters*, *6*(3), 290-292. https://doi.org/10.1098/rsbl.2009.0960

Rugani, R., Vallortigara, G., Vallini, B., & Regolin, L. (2011). Asymmetrical number-space mapping in the avian brain. *Neurobiology of learning and memory*, *95*(3), 231-238.

Rugani, R., Rosa Salva, O., & Regolin, L. (2014). Lateralized mechanisms for encoding of object. Behavioral evidence from an animal model : the domestic chick (Gallus gallus). *Frontiers in Psychology*, *5*, 150.

Rugani, R., Vallortigara, G., Priftis, K., & Regolin, L. (2015). Number-space mapping in the newborn chick resembles humans' mental number line. *Science*, *347*(6221), 534-536.

Rugani, R., Vallortigara, G., & Regolin, L. (2016). Mapping number to space in the two hemispheres of the avian brain. *Neurobiology of Learning and Memory*, *133*, 13-18.

Rugani, R., & De Hevia, M.-D. (2017). Number-space associations without language : Evidence from preverbal human infants and non-human animal species. *Psychonomic Bulletin & Review*, *24*(2), 352-369. https://doi.org/10.3758/s13423-016-1126-2

Rugani, R., & Regolin, L. (2020). Hemispheric specialization in spatial versus ordinal processing in the day-old domestic chick (Gallus gallus). *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1477*(1), 34-43.

Rugani, R., Zhang, Y., Ahmed, N., & Brannon, E. (2022). Children perform better on left than right targets in an ordinal task. *Acta Psychologica*, *226*, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2022.103560

Rugani, R., Platt, M. L., Zhang, Y., & Brannon, E. M. (2024). Magnitude shifts spatial attention from left to right in rhesus monkeys as in the human mental number line. *Iscience*, *27*(2).

Rugani, R., Macchinizzi, M., Zhang, Y., & Regolin, L. (2025). Prenatal light exposure affects number sense and the mental number line in young domestic chicks. *eLife*, *14*, RP106356.

Russell, J., Jarrold, C., & Henry, L. (1996). Working memory in children with autism and with moderate learning difficulties. *Journal of child psychology and psychiatry*, *37*(6), 673-686.

Sahan, M. I., van Dijck, J.-P., & Fias, W. (2022). Eye-movements reveal the serial position of the attended item in verbal working memory. *Psychonomic bulletin & review*, *29*(2), 530-540. https://doi.org/10.3758/s13423-021-02005-9

Schwarz, W., & Keus, I. M. (2004). Moving the eyes along the mental number line : Comparing SNARC effects with saccadic and manual responses. *Perception & psychophysics*, *66*(4), 651-664. https://doi.org/10.3758/BF03194909

Schroth, L. S. M., Fias, W., & Sahan, M. I. (2025). Eye movements follow the dynamic shifts of attention through serial order in verbal working memory. *Scientific Reports*, *15*(1), 1-11. https://doi.org/10.1038/s41598-024-85015-6

Seltzer, C., Forsythe, C., & Ward, J. P. (1990). Multiple measures of motor lateralization in human primates (Homo sapiens). *Journal of Comparative Psychology*, *104*(2), 159.

Shaki, S., Fischer, M., & Petrusic, W. (2009). Reading habits for both words and numbers contribute to the SNARC effect. *Psychonomic bulletin & review*, *16*(2), 328-331. https://doi.org/10.3758/PBR.16.2.328

Shaki, S., Fischer, M., & Göbel, S. (2012). Direction counts : A comparative study of spatially directional counting biases in cultures with different reading directions. *Journal of Experimental Child Psychology*, *112*(2), 275-281. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2011.12.005

Shaki, S., & Fischer, M. H. (2018). Deconstructing spatial-numerical associations. *Cognition*, *175*, 109-113.

Shi, W., Wang, Q., Zhao, F., & Zhao, X. (2020). The spatial coding mechanism of ordinal symbols : A study based on the ordinal position effect. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *82*(3), 1051-1062. https://doi.org/10.3758/s13414-019-01930-1

Shrestha, N. (2020). Detecting multicollinearity in regression analysis. *American journal of applied mathematics and statistics*, *8*(2), 39-42.

Simmering, V. R. (2012). The development of visual working memory capacity during early childhood. *Journal of experimental child psychology*, *111*(4), 695-707.

Sixtus, E., Lonnemann, J., Fischer, M. H., & Werner, K. (2019). Mental number representations in 2D space. *Frontiers in psychology*, *10*, 172.

Smalle, E. H., Bogaerts, L., Simonis, M., Duyck, W., Page, M., Edwards, M. G., & Szmalec, A. (2016). Can chunk size differences explain developmental changes in lexical learning ? *Frontiers in psychology*, *6*, 1925.

Smalle, E. H., Muylle, M., Szmalec, A., & Duyck, W. (2017). The different time course of phonotactic constraint learning in children and adults : Evidence from speech errors. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, *43*(11), 1821.

Smalle, E. H., Page, M. P., Duyck, W., Edwards, M., & Szmalec, A. (2018). Children retain implicitly learned phonological sequences better than adults : A longitudinal study. *Developmental Science*, *21*(5), e12634.

Smith, E. (2015). *Exploring the nature of verbal short-term memory in Down syndrome and developing potential routes for intervention* [thèse de doct., University of Bristol].

Spurgeon, J., Ward, G., Matthews, W. J., & Farrell, S. (2015). Can the effects of temporal grouping explain the similarities and differences between free recall and serial recall ? *Memory & cognition*, *43*(3), 469-488.

Sternberg, S. (1966). High-speed scanning in human memory. *science*, *153*(3736), 652-654. https://doi.org/10.1126/science.153.3736.652

Stochl, J., & Croudace, T. (2013). Predictors of human rotation. *Laterality : Asymmetries of Body, Brain and Cognition*, *18*(3), 265-281.

Streuli, J. C., Obrist, G., & Brugger, P. (2017). Childrens' left-turning preference is not modulated by magical ideation. *Laterality : Asymmetries of Body, Brain and Cognition*, *22*(1), 90-104.

Szmalec, A., Duyck, W., Vandierendonck, A., Mata, A. B., & Page, M. P. (2009). Short article : The Hebb repetition effect as a laboratory analogue of novel word learning. *Quarterly journal of experimental psychology*, *62*(3), 435-443.

Szmalec, A., Loncke, M., Page, M., & Duyck, W. (2011). Order or disorder ? Impaired Hebb learning in dyslexia. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, *37*(5), 1270.

Szmalec, A., Page, M. P., & Duyck, W. (2012). The development of long-term lexical representations through Hebb repetition learning. *Journal of Memory and Language*, *67*(3), 342-354.

Tam, H., Jarrold, C., Baddeley, A., & Sabatos-DeVito, M. (2010). The development of memory maintenance : Children's use of phonological rehearsal and attentional refreshment in working memory tasks. *Journal of Experimental Child Psychology*, *107*(3), 306-324.

Tan, L., & Ward, G. (2007). Output order in immediate serial recall. *Memory & Cognition*, *35*(5), 1093-1106.

Tavakkoli, M. H., & Jose, T. (2013). The reason why do athletes run around the track counter-clockwise. *Int. J. Educ. Dev*, *2*, 23-30.

Taylor, M. J. D., Strike, S. C., & Dabnichki, P. (2007). Turning bias and lateral dominance in a sample of able-bodied and amputee participants. *Laterality*, *12*(1), 50-63.

Thevenot, C., Fayol, M., & Barrouillet, P. (2018). Spatial numerical associations in preschoolers. *Thinking & Reasoning*, *24*(2), 221-233.

Thissen, D., Steinberg, L., & Kuang, D. (2002). Quick and easy implementation of the Benjamini-Hochberg procedure for controlling the false positive rate in multiple comparisons. *Journal of educational and behavioral statistics*, *27*(1), 77-83.

Thomassen, A. J., & Tuelings, H.-L. H. (1979). The development of directional preference in writing movements. *Visible Language*, *13*(3), 299.

Thyer, W., Adam, K. C., Diaz, G. K., Velazquez Sanchez, I. N., Vogel, E. K., & Awh, E. (2022). Storage in visual working memory recruits a content-independent pointer system. *Psychological Science*, *33*(10), 1680-1694.

Tian, Y., & Fischer-Baum, S. (2025). The role of spatial processing in verbal serial order working memory. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *25*, 210-239. https://doi.org/10.3758/s13415-024-01240-6

Tosatto, L., Fagot, J., & Rey, A. (2023). The dynamics of chunking in humans (Homo sapiens) and Guinea baboons (Papio papio). *Journal of Comparative Psychology*.

Toussaint, Y., & Fagard, J. (2008). A counterclockwise bias in running. *Neuroscience letters*, *442*(1), 59-62.

Toumanari, A. (2025). Les pointeurs en C.

Troadec, B., & Zarhbouch, B. (2011). Flèche du temps, compétences linguistiques et routines culturelles : une étude de la diversité chez des enfants de 10-11 ans en France et au Maroc. *L'année psychologique*, *111*(2), 227-252. https://doi.org/10.3917/anpsy.112.0227

Unsworth, N., & Engle, R. W. (2007). The nature of individual differences in working memory capacity : active maintenance in primary memory and controlled search from secondary memory. *Psychological review*, *114*(1), 104.

Valdois, S., Bosse, M.-L., Ans, B., Carbonnel, S., Zorman, M., David, D., & Pellat, J. (2003). Phonological and visual processing deficits can dissociate in developmental dyslexia : Evidence from two case studies. *Reading and Writing*, *16*, 541-572.

Valdois, S., Lassus-Sangosse, D., Lallier, M., Moreaud, O., & Pisella, L. (2019). What bilateral damage of the superior parietal lobes tells us about visual attention disorders in developmental dyslexia. *Neuropsychologia*, *130*, 78-91.

van Dijck, J.-P., Gevers, W., & Fias, W. (2009). Numbers are associated with different types of spatial information depending on the task. *Cognition*, *113*(2), 248-253. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2009.08.005

van Dijck, J.-P., & Fias, W. (2011). A working memory account for spatial–numerical associations. *Cognition*, *119*(1), 114-119. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2010.12.013

van Dijck, J.-P., Abrahamse, E., Majerus, S., & Fias, W. (2013). Spatial attention interacts with serial-order retrieval from verbal working memory. *Psychological science*, *24*(9), 1854-1859. https://doi.org/10.1177/0956797613479610

van Dijck, J.-P., Abrahamse, E., Acar, F., Ketels, B., & Fias, W. (2014). A working memory account of the interaction between numbers and spatial attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *67*(8), 1500-1513. https://doi.org/10.1080/17470218.2014.903984

van Dijck, J.-P., Fias, W., & Andres, M. (2015). Selective interference of grasp and space representations with number magnitude and serial order processing. *Psychonomic bulletin & review*, *22*, 1370-1376. https://doi.org/10.3758/s13423-014-0788-x

van Dijck, J.-P., Abrahamse, E., & Fias, W. (2020). Do preliterate children spontaneously employ spatial coding for serial order in working memory ? *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1477*(1), 91-99. https://doi.org/10.1111/nyas.14430

van Dijck, J.-P., Fias, W., & Cipora, K. (2022). Spatialization in working memory and its relation to math anxiety. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1512*(1), 192-202. https://doi.org/10.1111/nyas.14765

Vivion, M., Ftaïta, M., Guida, A., & Mathy, F. (2025a). Processing order in short-term memory is spatially biased in children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *252*, 1-36. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2024.106171

Vivion, M., Guida, A., Ramanoël, S., & Mathy, F. (2025b). Spatial–positional association of response codes is modulated by the number of items in working memory. *Memory & Cognition*, 1-28.

Vivion, M. (2021). Spatialisation en mémoire d'informations syntaxiques chez l'enfant d'âge préscolaire [Mémoire de Master non publié, Université Côte d'Azur].

Wagner, I. C., Konrad, B. N., Schuster, P., Weisig, S., Repantis, D., Ohla, K., Kühn, S., Fernández, G., Steiger, A., Lamm, C., et al. (2021). Durable memories and efficient neural coding through mnemonic training using the method of loci. *Science advances*, *7*(10), eabc7606.

Wagner, R. K., Torgesen, J. K., & Rashotte, C. A. (1994). Development of reading-related phonological processing abilities : New evidence of bidirectional causality from a latent variable longitudinal study. *Developmental psychology*, *30*(1), 73. https://doi.org/10.1037/0012-1649.30.1.73

Wang, Q., Liu, M., Shi, W., & Kang, J. (2018). Mechanism of the SNARC effect in numerical magnitude, time sequence, and spatial sequence tasks : Involvement of LTM and WM. *Frontiers in psychology*, *9*(1558), 1-12. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01558

Ward, G., Tan, L., & Grenfell-Essam, R. (2010). Examining the relationship between free recall and immediate serial recall : the effects of list length and output order. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, *36*(5), 1207.

Wechsler, D. (2016). *WISC-V - Échelle d'intelligence de Wechsler pour enfants et adolescents - 5ème édition*. Paris : Éditions du Centre de Psychologie Appliquée.

Werner-Seidler, A., & Dalgleish, T. (2016). The method of loci improves longer-term retention of self-affirming memories and facilitates access to mood-repairing memories in recurrent depression. *Clinical Psychological Science*, *4*(6), 1065-1072.

West, E., & McCrink, K. (2021). Eye tracking lateralized spatial associations in early childhood. *Journal of Cognition and Development*, *22*(5), 678-694. https://doi.org/10.1080/15248372.2021.1926254

Wickelgren, W. A. (1965). Short-term memory for phonemically similar lists. *The American Journal of Psychology*, *78*(4), 567-574.

Williams, B. R., Ponesse, J. S., Schachar, R. J., Logan, G. D., & Tannock, R. (1999). Development of inhibitory control across the life span. *Developmental psychology*, *35*(1), 205.

Winter, B., & Matlock, T. (2013). More is up... and right : Random number generation along two axes. *Proceedings of the annual meeting of the cognitive science society*, *35*(35).

Wohlschläger, A., & Wohlschläger, A. (1998). Mental and manual rotation. *Journal of Experimental Psychology : Human perception and performance*, *24*(2), 397.

Wood, G., Willmes, K., Nuerk, H.-C., & Fischer, M. (2008). On the cognitive link between space and number : A meta-analysis of the SNARC effect. *Psychology science quarterly*, *50*(4), 489-504. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:53508874

Yanaoka, K., Nakayama, M., Jarrold, C., & Saito, S. (2019). Determining the developmental requirements for hebb repetition learning in young children : Grouping, short-term memory, and their interaction. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, *45*(4), 573.

Yates, F. A. (1966). *The Art of Memory*. The University of Chicago press.

Yazgan, M. Y., Leckman, J. F., & Wexler, B. E. (1996). A direct observational measure of whole body turning bias. *Cortex*, *32*(1), 173-176.

Zacks, J. M. (2008). Neuroimaging studies of mental rotation : a meta-analysis and review. *Journal of cognitive neuroscience*, *20*(1), 1-19.

Zakrzewski, S., Merrill, E., & Yang, Y. (2025). Can gamification improve children's performance in mental rotation ? *Journal of Experimental Child Psychology*, *252*, 106169.

Zebian, S. (2005). Linkages between number concepts, spatial thinking, and directionality of writing : The SNARC effect and the reverse SNARC effect in English and Arabic monoliterates, biliterates, and illiterate Arabic speakers. *Journal of*

Cognition and Culture, *5*(1-2), 165-190. https://doi.org/10.1163/156853705406 8660

Zhou, D., Zhong, H., Dong, W., Li, M., Verguts, T., & Chen, Q. (2019). The metaphoric nature of the ordinal position effect. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *72*(8), 2121-2129. https://doi.org/10.1177/1747021819832860

Zhou, D., Luo, J., Yi, Z., Li, Y., Yang, S., Verguts, T., & Chen, Q. (2020). The hand-lateralization of spatial associations in working memory and long-term memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *73*(8), 1150-1161. https://doi.org/10.1177/1747021819899533

Zhou, D., Cai, Q., Luo, J., Yi, Z., Li, Y., Seger, C. A., & Chen, Q. (2021). The neural mechanism of spatial-positional association in working memory : A fMRI study. *Brain and Cognition*, *152*, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.bandc.2021.105756

Crédits

Figures du Chapitre 1

Icônes utilisées dans les Figures :
Tirées et/ou adaptées de **PowerPoint / Microsoft 365**.

Grotte :
Création de **Hindia Kreativ** via Canva.com

Stimuli de l'Expérience 1

Abeille :
Création de **OpenClipart-Vectors** via Pixabay.com. Récupéré à : https://pixabay.com/vectors/bee-bi-cartoon-honey-insect-1296273/

Cadeau :
Création de **dapple-designers** via Pixabay.com. Récupéré à : https://pixabay.com/vectors/gift-box-gift-box-birthday-4536515/

Cochon :
Création de **OpenClipart-Vectors** via Pixabay.com. Récupéré à : https://pixabay.com/fr/vectors/animal-dessin-anim%C3%A9-cultiver-1296764/

Fourmi :
Création de **Clker-Free-Vector-Images** via Pixabay.com. Récupéré à : https://pixabay.com/vectors/ant-smiling-cartoon-orange-happy-305721/

Grenouille :
Création de **Stephanie_Curry** via Pixabay.com. Récupéré à : https://pixabay.com/vectors/frog-cartoon-toad-character-cute-2644410/

Mouton :
Création de **bknis** via Pixabay.com. Récupéré à : https://pixabay.com/fr/vectors/agneau-le-mouton-mignonne-cultiver-1388937/

Tortue :
Création de **OpenClipart-Vectors** via Pixabay.com. Récupéré à : https://pixabay.

com/fr/vectors/animaux-dessin-anim%C3%A9-vert-content-1298747/

Stimuli de l'Expérience 4

Maman cochon 1 :
Création de **catalyststuff** via Freepik.com. Récupéré et adapté de : https://www.freepik.com/free-vector/cute-pig-thinking-cartoon-vector-icon-illustration-animal-nature-icon-concept-isolated-premium-flat_40915432.htm#query=baby%20pig&position=1&from_view=search&track=ais

Maman cochon 2 :
Création de **catalyststuff** via Freepik.com. Récupéré et adapté de : https://www.freepik.com/free-vector/cute-pig-sitting-cartoon-vector-icon-illustration-animal-nature-icon-concept-isolated-premium-flat_40513463.htm#fromView=keyword&page=1&position=0&uuid=901d3be8-6ac4-401a-bad4-49f4d490526b&query=Cute+Pig

Bébé cochon :
Création de **andhndstd** via Freepik.com. [Lien obsolète]

Stimuli de l'Expérience 5

Framboise :
Création de **vectorpocket** via Freepik.com. Récupéré et adapté de : https://www.freepik.com/free-vector/vector-illustration-juicy-raspberry-isolated-white_1215960.htm#page=1&query=raspberry&position=0&from_view=searchhttps://

Grenade :
Création de **freepik** via Freepik.com. Récupéré et adapté de : https://fr.freepik.com/vecteurs-libre/fond-grenade-dessine-main_3885171.htm#page=1&query=grenade&position=20&from_view=search

Kiwi :
Création de **Icons8**. Récupéré et adapté de : https://icones8.fr/icon/dmcVIE1ztYMm/kiwi

Myrtille :
Création de **Vecteezy** via Vecteezy.com. Récupéré et adapté de : https://www.vecteezy.com/vector-art/3486476-doodle-freehand-sketch-drawing-of-blueberry-fruit

Stimuli de l'Expérience 7

Astronaute 1 :
Création de **catalyststuff** via Freepik.com. Récupéré à : https://fr.freepik.com/vecteurs-libre/astronaute-lancant-espace-agitant-illustration-dessin-anime-main-concept-technologie-scientifique-isole-style-dessin-anime-plat_16425757.htm#page=3&query=space%20character&position=4&from_view=search

Astronaute 2 :
Création de **catalyststuff** via Freepik.com. Récupéré à : https://fr.freepik.com/vecteurs-libre/astronaute-assis-planete-agitant-main-cartoon-vector-icon-illustration-concept-icone-technologie-science-isole-vecteur-premium-style-dessin-anime-plat_16953182.htm#query=space%20character&position=2&from_view=search

Fond consignes :
Création de **coolvector** via Freepik.com. Récupéré à : https://www.freepik.com/free-vector/futuristic-technological-wallpaper_10987662.htm#page=5&query=wallpaper&position=8&from_view=search

Feedback positif :
Création de **upklyak** via Freepik.com. Récupéré à : https://fr.freepik.com/vecteurs-libre/boules-electriques-spheres-plasma-bleues-oranges_7743082.htm#page=2&query=boule%20de%20plasma&position=3&from_view=search

Feedback négatif :
Création de **Twemoji** via Canva.com

Feedback neutre :
Création de **pixabay** via Canva.com

Table des figures

1.1 Exemple d'une droite de régression de la différence des temps de réponse moyens entre main droite et main gauche (d_{TR}) en fonction de la position de l'item dans la séquence mémorisée. 9

1.2 Exemple des tâches de détection de cible utilisées dans l'étude de van Dijck et al. (2013) (A) et de de Belder et al. (2015) (B) 13

1.3 Paradigme expérimental de référence pour la mesure de l'effet SPoARC 18

1.4 Exemple des tâches utilisées dans les études de Rugani et al. (2015) (A) et de Rugani et al. (2010) (B) pour mesurer un biais spatial chez le poussin 24

1.5 Paradigme de la grotte utilisé par Guida et al. (2020b) pour mesurer un effet SPoARC chez l'enfant 35

2.1 Configurations spatiales des essais d'entraînement et de test pour l'Expérience 1 52

2.2 Distribution des réponses entre les six boîtes pour l'analyse groupée de l'Expérience 1 54

2.3 Distribution des réponses entre les six boîtes pour chaque groupe d'âge de l'Expérience 1 56

2.4 Exemple de référentiel égocentrique et allocentrique pouvant être appliqué par le participant adoptant un biais gauche-droite et conduisant à des réponses spatialement inversées dans la tâche de transposition de l'Expérience 1 62

2.5 Configurations spatiales des essais d'entraînement et de test pour l'Expérience 2 65

2.6 Distribution des réponses entre les six boîtes pour chaque groupe d'âge de l'Expérience 2 67

2.7 Configurations spatiales des essais d'entraînement et de test pour l'Expérience 3 72

2.8 Distribution des réponses obtenues dans l'Expérience 3 74

2.9 Distribution des réponses obtenues dans l'Expérience 3 en fonction du sens de rotation (horaire *vs.* antihoraire) 76

2.10 Exemple des sens de rotation pouvant être appliqués pour passer d'une disposition sagittale à une disposition horizontale 79

2.11 Séquences animées utilisées dans l'Expérience 4 86

2.12 Distribution des réponses obtenues dans la condition Occulteur et dans la condition Translation pour chaque groupe d'âge de l'Expérience 4 . . 89

2.13 Comparaison des distributions de réponses par groupe d'âge entre l'Expérience 1 et chaque condition de l'Expérience 4 92

2.14 Comparaison des distributions de réponses par groupe d'âge entre l'Expérience 2 et chaque condition de l'Expérience 4 93

2.15 Comparaison des distributions entre l'Expérience 3 et chaque condition de l'Expérience 4 94

3.1 Effet SPoARC des études répertoriées dans l'analyse comparative conduite pour l'Expérience 5 105

3.2 Tâche de spatialisation utilisée dans l'Expérience 5 en condition Image 114

3.3 Moyenne et régressions linéaires des temps réponse (exprimés en millisecondes) en fonction de la position de l'item dans la séquence, de la main de réponse et de la quantité de sondes dans l'Expérience 5 123

3.4 Régression linéaire de la différence des temps de réponse moyens (d_{TR}) entre main droite et main gauche en fonction de la position de l'item dans la séquence mémorisée et de la quantité de sondes dans l'Expérience 5 . 126

3.5 Pentes empiriques et intervalles de confiance à 80% (calculées par bootstrap sur la base de 5000 rééchantillonnages) pour l'ensemble des participants de l'Expérience 5 129

3.6 Moyenne et régression linéaire des temps réponse (exprimés en millisecondes) en fonction de la position de l'item dans la séquence, de la main de réponse et du nombre d'items pour l'Expérience 6 146

3.7 Moyenne et régression linéaire des temps réponse (exprimés en millisecondes) en fonction de la position de l'item dans la séquence, de la main de réponse, du groupe d'âge et du nombre d'items pour l'Expérience 6 . 148

3.8 Régression linéaire de la différence des temps de réponse moyens (d_{TR}) entre main droite et main gauche en fonction de la position de l'item, du groupe d'âge et de la longueur de la séquence mémorisée pour l'Expérience 6 149

3.9 Proportions de spatialiseurs gauche-droite, non-spatialiseurs et spatialiseurs droite-gauche en fonction du groupe d'âge et de la longueur de séquence dans l'Expérience 6 153

3.10 Corrélation entre l'indice de spatialisation et la capacité maximale des participants de l'Expérience 6 157

3.11 Régression linéaire de la différence des temps de réponse moyens (d_{TR}) entre main droite et main gauche en fonction de la position de l'item, du groupe d'âge et de la longueur de la séquence mémorisée pour l'Expérience 7 168

3.12 Proportions de spatialiseurs gauche-droite, non-spatialiseurs et spatialiseurs droite-gauche en fonction du groupe d'âge et de la longueur de la séquence dans l'Expérience 7 170

4.1 Moyenne et régression linéaire des temps réponse (exprimés en millisecondes) en fonction du numéro d'essai pour chaque séquence répétée de l'Expérience 8 201

4.2 Moyenne et régression linéaire des temps réponse (exprimés en millisecondes) en fonction de la position de l'item dans la séquence, de la main de réponse et du bloc pour les données répétées de l'Expérience 8 . . . 204

4.3 Régression linéaire de la différence des temps de réponse moyens (d_{TR}) entre main droite et main gauche en fonction de la position de l'item et du bloc pour les données répétées de l'Expérience 8 205

4.4 Régression linéaire de la différence des temps de réponse moyens (d_{TR}) entre main droite et main gauche en fonction de la position de l'item et du sous-bloc pour l'Expérience 8 208

4.5 Corrélation entre l'indice de spatialisation obtenu dans le premier bloc et l'indice d'apprentissage des participants de l'Expérience 8 212

4.6 Régression linéaire de la différence des temps de réponse moyens (d_{TR}) entre main droite et main gauche en fonction de la position de l'item et du bloc pour les données répétées de l'Expérience 9 224

4.7 Représentations spatiales et patterns comportementaux associés au premier stade (A) et au deuxième stade (B) de l'apprentissage répété d'une série segmentée en deux petits chunks. 229

4.8 Régression linéaire de la différence des temps de réponse (d_{TR}) moyens entre main droite et main gauche en fonction de la position de l'item, du bloc et du type de séquence mémorisées par les participants de l'Expérience 10 237

4.9 Régression linéaire de la différence des temps de réponse (d_{TR}) moyens entre main droite et main gauche en fonction de la position de l'item et du sous-bloc pour les séquences répétées et non-répétées de l'Expérience 10 239

A.1 Patterns de temps de réponse (A) et de différence de temps de réponse (B) caractéristiques du SPoARC 319

B.1 Dessins colorés utilisés comme stimuli dans la tâche de rotation des Expériences 1, 2 et 3 322

B.2 Corrélation entre les réponses correctes non-directionnelles et l'âge (à l'exclusion des adultes) dans l'Expérience 1 323

B.3 Exemple d'un axe de rotation antihoraire *vs.* horaire 329

B.4 Illustration des rectangles projetés à l'écran lors de l'exercice de rotation de la Mini-étude 1 332

B.5 Répartition des types de rotation effectuées en fonction de l'objet manipulé dans la Mini-étude 1 334

C.1 Proportions de bonnes réponses par item (cibles et leurres) dans l'Expérience 5 344

C.2 Proportions de bonnes réponses par item (cibles uniquement) dans l'Expérience 5 345

C.3 Histogramme des temps de réponse de l'Expérience 5 après winsorisation 346

C.4 Moyenne et régression linéaire des temps réponse (exprimés en millisecondes) en fonction de la position de l'item dans la séquence et de la main de réponse pour l'Expérience 5 347

C.5 Régression linéaire de la différence des temps de réponse moyens (d_{TR}) entre main droite et main gauche en fonction de la position de l'item dans la séquence mémorisée pour l'ensemble des participants de l'Expérience 5 348

C.6 Régression linéaire de la différence des temps de réponse moyens (d_{TR}) entre main droite et main gauche en fonction de la position de l'item dans la séquence mémorisée et du type de stimulus pour l'Expérience 5 349

C.7 Comparaison des pentes empiriques et leur intervalle de confiance à 80% (calculées par bootstrap sur la base de 5000 rééchantillonnages) entre les conditions Mono-cible et Multi-cibles de l'Expérience 5 350

C.8 Comparaison des pentes empiriques et leur intervalle de confiance à 80% (calculées par bootstrap sur la base de 5000 rééchantillonnages) entre les conditions Image et Mot de l'Expérience 5 351

C.9 Histogramme des temps de réponse de l'Expérience 6 après winsorisation 354

C.10 Régression linéaire de la différence des temps de réponse moyens (d_{TR}) entre main droite et main gauche en fonction de la position de l'item dans la séquence mémorisée et de la longueur de la séquence dans l'Expérience 6357

C.11 Pentes de spatialisation moyennes de l'Expérience 6, en fonction du groupe d'âge et du nombre d'items dans la séquence 358

C.12 Pentes empiriques et leur intervalle de confiance à 80% (calculées par bootstrap sur la base de 5000 rééchantillonnages) pour chaque groupe d'âge et chaque longueur dans l'Expérience 6 359

C.13 Corrélogramme entre l'âge, le niveau de lecture (vitesse et exactitude), le niveau d'écriture (vitesse et graphisme) et la capacité maximale des participants de l'Expérience 6 360

C.14 Diapositives des consignes et diapositive de fin utilisées dans la tâche de spatialisation de l'Expérience 7 362

C.15 Feedbacks utilisés dans la tâche de spatialisation de l'Expérience 7 . . . 362

C.16 Histogramme des temps de réponse de l'Expérience 7 après winsorisation 363

C.17 Corrélogramme entre l'âge chronologique, le niveau de lecture (vitesse et exactitude), d'écriture (vitesse et graphisme) et la capacité en mémoire (capacité maximale, score en ordre direct et score en ordre inverse) des participants de l'Expérience 7 ($N = 62$) 365

C.18 Corrélogramme entre l'âge chronologique, l'âge lexique, le niveau d'écriture (vitesse et graphisme) et la capacité en mémoire (capacité maximale, score en ordre direct et score en ordre inverse) des participants de l'Expérience 7 ($N = 68$) 366

D.1 Histogramme des temps de réponse de l'Expérience 8 après winsorisation 370

D.2 Moyenne et régression linéaire des temps réponse (exprimés en millisecondes) en fonction du numéro d'essai pour chaque session des données non-répétées analysées dans l'Expérience 8 (données tirées de Vivion et al., 2025b, Exp.1) 375

D.3 Histogramme des temps de réponse après winsorisation des données non-répétées analysées dans l'Expérience 8 (données tirées de Vivion et al., 2025b, Exp.1) 376

D.4 Régression linéaire de la différence des temps de réponse moyens (d_{TR}) entre main droite et main gauche en fonction de la position de l'item et du bloc pour les données non-répétées analysées dans l'Expérience 8 (données tirées de Vivion et al., 2025b, Exp.1) 377

D.5 Moyenne et régression linéaire des temps réponse (exprimés en millisecondes) en fonction du numéro d'essai pour chaque séquence répétée de l'Expérience 9 379

D.1 Histogramme des temps de réponse de l'Expérience 9 après winsorisation 380

D.7 Régression linéaire de la différence des temps de réponse moyens (d_{TR}) entre main droite et main gauche en fonction de la position de l'item et du sous-bloc pour l'Expérience 9 384

D.8 Moyenne et régression linéaire des temps réponse (exprimés en millisecondes) en fonction du numéro d'essai pour chaque session des données non-répétées de l'Expérience 6 (ré-analysées dans le cadre de l'Expérience 9 dans un objectif comparatif) 386

D.9 Histogramme des temps de réponse après winsorisation des données non-répétées de l'Expérience 6 (ré-analysées dans le cadre de l'Expérience 9 dans un objectif comparatif) 387

D.10 Régression linéaire de la différence des temps de réponse moyens (d_{TR}) entre main droite et main gauche en fonction de la position de l'item et du bloc pour les données non-répétées de l'Expérience 6 (ré-analysées dans le cadre de l'Expérience 9 dans un objectif comparatif) 388

D.11 Moyenne et régression linéaire des temps réponse (exprimés en millisecondes) en fonction du numéro d'essai pour chaque séquence répétée de l'Expérience 10 392

D.12 Moyenne et régression linéaire des temps réponse (exprimés en millisecondes) en fonction du numéro d'essai pour chaque session de la tâche non-répétée de l'Expérience 10 393

D.13 Histogramme des temps de réponse de l'Expérience 10 après winsorisation 394

D.14 Moyenne et régression linéaire des temps réponse (exprimés en millisecondes) en fonction de la position de l'item dans la séquence, de la main de réponse, du bloc et du type de séquence mémorisées par les participants de l'Expérience 10 396

Liste des tableaux

2.1 Effectif et âge moyen pour chaque groupe de l'Expérience 1 49

2.2 Distribution des réponses entre les six boîtes pour chaque groupe d'âge de l'Expérience 1 55

2.3 Distribution des réponses entre les six boîtes pour les groupes de MS & GS et CM1 & CM2 de l'Expérience 1 et les groupes de GS et CM2 de l'Expérience 2 68

2.4 Tableau de contingence de la distribution des réponses congruentes, inverses et incongruentes en fonction du point de départ adopté pour la tâche de comptage de l'Expérience 3 76

2.5 Tableau de contingence de la distribution des réponses congruentes, inverses et incongruentes selon le sens de rotation effectué dans l'Expérience 3 76

2.6 Distribution des réponses congruentes, inverses et incongruentes des Expériences 1, 2 et 3 pour les groupes de CM1 & CM2 77

2.7 Effectif et âge moyen pour chaque groupe et chaque condition de l'Expérience 4. 82

2.8 Distribution des réponses pour chaque groupe d'âge dans la condition Occulteur et dans la condition Translation de l'Expérience 4 88

3.1 Index des études répertoriées dans l'analyse comparative de l'effet SPoARC104

3.2 Modèles linéaires mixtes généralisés implémentés pour l'Expérience 5 . 119

3.3 Classement des modèles linéaires mixtes généralisés implémentés pour l'Expérience 5 selon leur nombre de paramètres (K), et leurs valeurs AICc, delta AICc et AICcWt 120

3.4 Résultats du modèle $M14$ de l'Expérience 5 121

3.5 Tableau de contingence reportant le nombre de participants (et le pourcentage correspondant) ayant une pente de régression significativement négative, significativement positive ou ne montrant pas d'effet suite à l'analyse bootstrap en fonction des quatre conditions expérimentales . . 130

3.6 Statistiques descriptives de la pente minimale obtenue entre les deux tâches de spatialisation, de la capacité mnésique et des performances en lecture/écriture, pour l'ensemble de l'échantillon et pour chaque groupe d'âge de l'Expérience 6 155

3.7 Statistiques descriptives de la pente minimale obtenue entre les deux tâches de spatialisation, de la capacité mnésique et des performances en lecture/écriture, pour l'ensemble de l'échantillon et pour chaque groupe d'âge de l'Expérience 7 172

3.8 Moyennes (et écart-type) de l'âge chronologique, des mesures de lecture/écriture et des performances mnésiques entre les deux clusters identifiés par l'analyse *k-means* de l'Expérience 7 174

4.1 Rappel libre : effectif et proportions de participants ayant rappelé entre zéro et quatre éléments pour chacune des deux séquences mémorisées dans l'Expérience 8, indépendamment de la position (Item) et en fonction de la position (Ordre) 199

4.2 Différence moyenne des temps de réponse (et écart-type) en fonction de la position dans la séquence, incluant les coefficients de régression, valeurs p et tailles d'effet des modèles linéaires exécutés pour chaque sous-bloc de l'Expérience 8 209

4.3 Rappel libre : effectif et proportions de participants ayant rappelé entre zéro et quatre éléments indépendamment de leur position (Item) et à leur bonne position (Ordre) pour chacune des deux séquences mémorisées dans l'Expérience 9 221

B.1 Caractéristiques de chaque nom d'animal utilisé comme stimulus dans la tâche de rotation des Expériences 1, 2 et 3 322

B.2 Résultats de la régression logistique comparant les réponses congruentes et inverses en fonction du groupe d'âge et de l'Expérience (1 *vs.* 2) . . . 324

B.3 Résultats de l'analyse log-linéaire effectuée sur la distribution des réponses en fonction de la condition (Occulteur *vs.* Translation) et du groupe d'âge dans l'Expérience 4 324

B.4 Distribution des réponses pour chaque groupe d'âge dans la condition Occulteur et dans la condition Translation de l'Expérience 4 pour les participants M_+ uniquement 325

B.5 Résultats de l'analyse log-linéaire comparant la distribution des réponses congruentes, inverses et incongruentes en fonction de l'Expérience (1 *vs.* 4) et du groupe d'âge 326

B.6 Résultats de l'analyse log-linéaire comparant la distribution des réponses congruentes, inverses et incongruentes en fonction de l'Expérience (2 *vs.* 4) et du groupe d'âge 326

B.7 Résultats de la correction de Benjamini et Hochberg (1995) sur les valeurs p observées pour le test binomial opposant les choix congruents aux choix inverse dans la condition Translation de l'Expérience 4 327

B.8 Tableau de contingence des rotations appliquées respectivement au formulaire papier et au téléphone portable par les participants de la Mini-étude 1 334

B.9 Tableau de contingence des rotations appliquées au téléphone portable en fonction de la position initiale des boutons de volumes et marche/arrêt dans la Mini-étude 1 335

C.1 Caractéristiques des noms de fruits utilisés dans l'Expérience 5 342

C.2 Nombre d'occurrences de chaque fruit par position pour la phase de mémorisation de la condition Multi-cibles de l'Expérience 5 342

C.3 Nombre d'occurrences de chaque fruit par rang (R1 à R8) dans la série de sondes présentées lors de la phase de reconnaissance de la condition Multi-cibles dans l'Expérience 5 343

C.4 Pourcentage (et écart-type) de réponses correctes en fonction de la condition expérimentale dans l'Expérience 5, d'abord pour l'ensemble des sondes (cibles et leurres) puis pour les items cibles uniquement 343

C.5 Pourcentage (et écart-type) de réponses correctes obtenues pour chaque item dans l'Expérience 5, selon le type de stimulus et tout type de stimulus confondu, d'abord pour l'ensemble des sondes (cibles et leurres) puis pour les items cibles uniquement 343

C.6 Résultats de l'ANOVA effectuée sur les temps de réponse log-transformés de l'Expérience 5 346

C.7 Temps de réponse moyens (et écart type) en fonction de la position de l'item, de la main de réponse et de la quantité de sondes (Mono-cible *vs.* Multi-cibles) pour l'Expérience 5 347

C.8 Résultats du modèle $M14_{S1}$ de l'Expérience 5 348

C.9 Différences des temps réponse moyennes (et écart-type) en fonction de la position de l'item dans la séquence mémorisée et de la main utilisée pour répondre pour les conditions Mono-cible et Multi-cibles, puis pour les conditions Image et Mot de l'Expérience 5 349

C.10 Résultats de l'analyse log-linéaire effectuée sur la distribution des types de spatialisation (Pente Négative, Pas d'effet ou Pente Positive) en fonction de la Quantité de sondes et du Type de Stimulus dans l'Expérience 5350

C.11 Pourcentage (et écart-type) de réponses correctes en fonction de la longueur de la séquence et du groupe d'âge dans l'Expérience 6, d'abord pour l'ensemble des sondes (cibles et leurres) puis pour les items cibles uniquement 354

C.12 Modèles linéaires mixtes généralisés de l'Expérience 6 355

C.13 Classement des modèles linéaires mixtes généralisés implémentés pour l'Expérience 6 selon leur nombre de paramètres (K), leur AICc, leur delta AICc et leur poids (AICcWt) 355

C.14 Résultats du modèle $M18$ de l'Expérience 6 356

C.15 Temps de réponse moyens (et écart type) en fonction de la position de l'item et de la main de réponse, pour chaque groupe d'âge et chaque longueur, ainsi que pour l'ensemble des groupes d'âges dans l'Expérience 6356

C.16 Différence des temps de réponse (d_{TR}) moyenne (et écart type) en fonction de la position de l'item pour chaque groupe d'âge et chaque longueur de séquence dans l'Expérience 6 357

C.17 Tableau de contingence croisant les profils de spatialisation entre les conditions L3 et L4 pour chaque groupe d'âge dans l'Expérience 6 . . . 360

C.18 Résultats du modèle exécuté sur l'indice de spatialisation des participants de l'Expérience 6 361

C.19 Pourcentage (et écart-type) de réponses correctes en fonction de la longueur de la séquence et du groupe d'âge dans l'Expérience 7, d'abord pour l'ensemble des sondes (cibles et leurres) puis pour les items cibles uniquement 363

C.20 Modèles linéaires mixtes généralisés implémentés dans l'Expérience 7 . 364

C.21 Classement des modèles linéaires mixtes généralisés implémentés pour l'Expérience 7 selon leur nombre de paramètres (K), leur AICc, leur delta AICc et leur poids (AICcWt) 364

C.22 Tableau de contingence croisant les profils de spatialisation entre les conditions L2 et L3 pour chaque groupe d'âge dans l'Expérience 7 . . . 365

C.23 Résultats des modèles exécutés sur l'indice de spatialisation des participants de l'Expérience 7 . . . 367

C.24 Moyennes (et écart-type) de l'âge chronologique, des mesures de lecture/écriture et de capacité mnésique entre les deux clusters identifiés par l'analyse *k-means* sur les données groupées de l'Expérience 6 et de l'Expérience 7 . . . 367

C.25 Moyennes (et écart-type) de l'âge chronologique, du niveau de lecture/écriture et des performances mnésiques des élèves de CE2 dans l'Expérience 6 et dans l'Expérience 7 . . . 368

D.1 Permutations de l'ordre dans lequel les séquences cibles et leurres ont été présentées aux participants pendant la tâche de rappel à long terme de l'Expérience 8. *Note.* Les première et deuxième séquences mémorisées par les participants lors de la tâche de spatialisation (séquences cibles) sont codées C1 et C2 respectivement. Les séquences leurres sont codées L. 370

D.2 Modèles linéaires mixtes généralisés de l'Expérience 8 . . . 371

D.3 Classement des modèles linéaires mixtes généralisés implémentés sur les données répétées de l'Expérience 8 selon leur nombre de paramètres (K), leur AICc, leur delta AICc et leur poids (AICcWt) . . . 371

D.4 Résultats du modèle $M8_R$ de l'Expérience 8 . . . 372

D.5 Temps de réponse moyens (et écart-type) en fonction de la position de l'item et de la main de réponse, sur l'ensemble de la tâche et pour chacun des deux blocs consécutifs de l'Expérience 8, d'abord pour les séquences répétées, puis pour les données non-répétées tirées de Vivion et al. (2025b, Exp.1) . . . 372

D.6 Temps de réponse moyens (et écart-type) en fonction de la position de l'item et de la main de réponse pour chacun des quatre sous-blocs consécutifs de l'Expérience 8 . . . 372

D.7 Tableau de contingence croisant le nombre de séquences identifiées lors du rappel à long terme indicé et les profils de spatialisation des participants de l'Expérience 8 . . . 378

D.8 Modèles linéaires mixtes généralisés de l'Expérience 9 . . . 380

D.9 Classement des modèles linéaires mixtes généralisés implémentés sur les données répétées de l'Expérience 9 selon leur nombre de paramètres (K), l'AICc, le delta AICc et le poids (AICcWt) 381

D.10 Résultats du modèle $M8_R$ pour l'Expérience 9 381

D.11 Temps de réponse moyens (et écart-type) en fonction de la position de l'item et de la main de réponse, sur l'ensemble de la tâche et pour chacun des deux blocs consécutifs de l'Expérience 9, d'abord pour les séquences répétées, puis pour les données non-répétées de l'Expérience 6 382

D.12 Temps de réponse moyens (et écart-type) en fonction de la position de l'item et de la main de réponse pour chacun des quatre sous-blocs consécutifs de l'Expérience 9 382

D.13 Différence moyenne des temps de réponse (et écart-type) en fonction de la position dans la séquence, incluant les coefficients de régression, valeurs p et tailles d'effet des modèles linéaires exécutés pour chaque sous-bloc de l'Expérience 9 383

D.14 Tableau de contingence croisant le nombre de séquences identifiées lors du rappel à long terme indicé et les profils de spatialisation des participants de l'Expérience 9 391

D.15 Modèles linéaires mixtes généralisés de l'Expérience 10 394

D.16 Classement des modèles linéaires mixtes généralisés implémentés sur les données répétées de l'Expérience 10 selon le nombre de paramètres (K), l'AICc, le delta AICc et le poids (AICcWt) 395

Annexe A

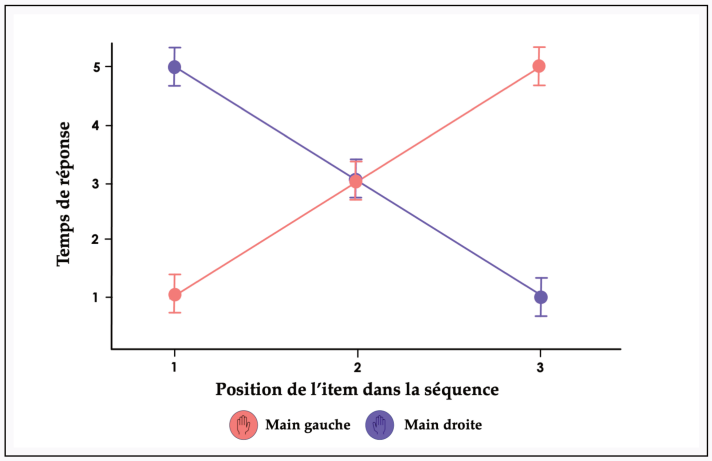
Matériel supplémentaire du Chapitre 1

Mini-exemple 1

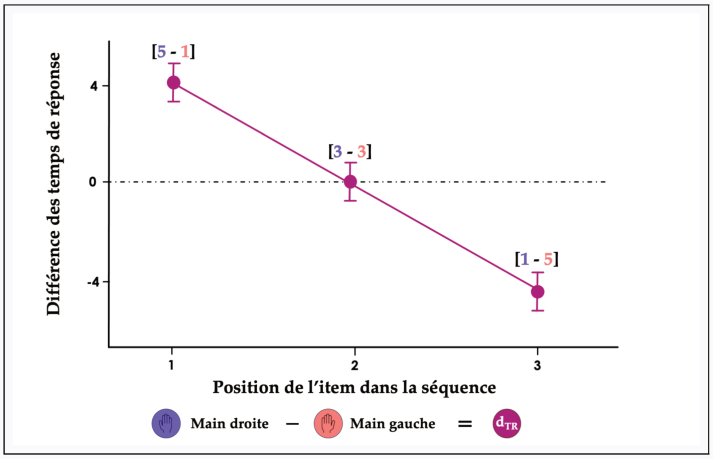
Calcul d'une pente de spatialisation

Ce mini-exemple propose de réaliser le calcul d'une pente de spatialisation en s'appuyant sur des valeurs fictives. Supposons une expérience dans laquelle un participant devait premièrement mémoriser une série de trois items, pour ensuite juger si un nouvel item faisait partie ou non de cette séquence. Pour la moitié des essais, le participant devait répondre « oui » en utilisant sa main gauche, et pour l'autre moitié des essais, la réponse « oui » était assignée à sa main droite. La Figure A.1a rend compte de la trajectoire des temps de réponse obtenus suite à sa passation. Il s'avère que ce participant – d'une régularité remarquable – présente un SPoARC parfaitement symétrique. La droite de régression rose rend compte des valeurs obtenues pour la main gauche, tandis que la droite violette illustre la trajectoire de la main droite. Pour le premier item, spatialisé à gauche de l'axe mental, des temps de réponse plus rapides sont observés pour la main gauche (une seconde), contre des temps très lents pour la main droite (i.e., cinq secondes en moyenne). Pour l'item en deuxième position (occupant une place centrale dans l'esprit du participant), des temps de réponse équivalents sont observés entre les deux mains, soit trois secondes pour la main gauche et pour la main droite. Pour le troisième item, représenté à droite de l'axe mental, la main droite est la plus rapide, avec des temps de réponse d'une seconde en moyenne, contre cinq secondes pour la main gauche.

Avec ces valeurs factices, il est maintenant possible de calculer la pente de régression caractéristique du SPoARC. Cette pente découle de la modélisation d'une nouvelle variable dépendante : la différence des temps de réponse entre les deux mains (notée d_{TR}). La Figure A.1b rend compte de ce calcul, qui consiste à soustraire les temps moyens de la main gauche à ceux de la main droite pour chaque unité du facteur position. Ainsi, pour le premier item, la d_{TR} correspond au temps de la main droite (5 sec) moins le temps de la main gauche (1 sec), soit une différence positive de quatre secondes. Pour le deuxième item, à temps de réponse équivalents, la d_{TR} est égale à zéro. Pour le troisième item, le temps de la main gauche (5 sec) est retranché au temps de la main droite (1 sec), aboutissant à une d_{TR} négative de -4 secondes. Ainsi, des d_{TR} positives reflètent un avantage de la main gauche, tandis que des d_{TR} négatives reflètent un avantage de la main droite. À partir de ces valeurs, un coefficient de régression de la différence de temps de réponse en fonction du facteur position est calculé. Ce coefficient est ensuite testé contre zéro pour déterminer si la pente obtenue reflète un SPoARC significatif.



(A)



(B)

FIGURE A.1 – Patterns de temps de réponse (A) et de différence de temps de réponse (B) caractéristiques du SPoARC

Annexe B

Matériel supplémentaire du Chapitre 2

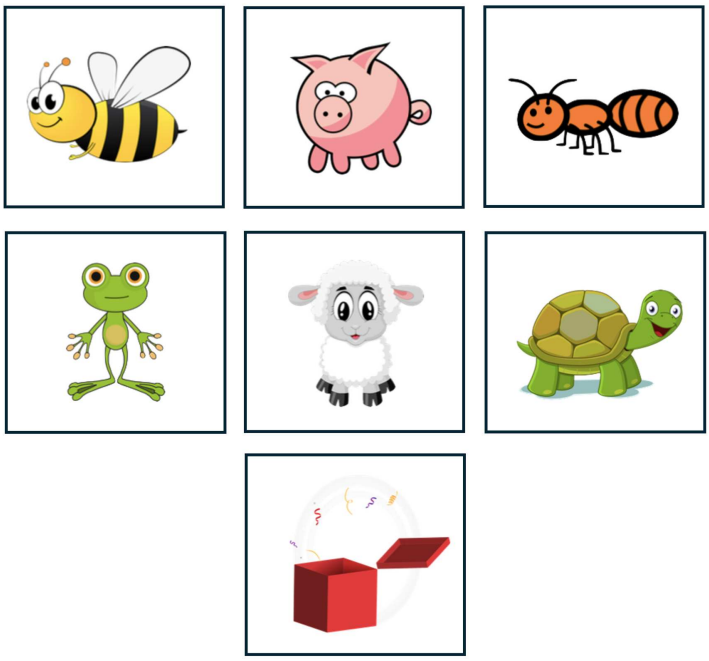


Figure B.1 – Dessins colorés utilisés comme stimuli dans la tâche de rotation des Expériences 1, 2 et 3

Tableau B.1 – Caractéristiques de chaque nom d'animal utilisé comme stimulus dans la tâche de rotation des Expériences 1, 2 et 3

Nom	Fréquence [1]	Âge d'acquisition
Abeille	3.18	1.88
Cochon	12.70	1.76
Fourmi	5.14	1.92
Grenouille	4.59	1.92
Mouton	14.12	1.65
Tortue	4.66	1.92

Note. Tous les noms d'animaux étaient bissyllabiques.
[1] Fréquence du mot dans 218 textes littéraires (par million d'occurrences)

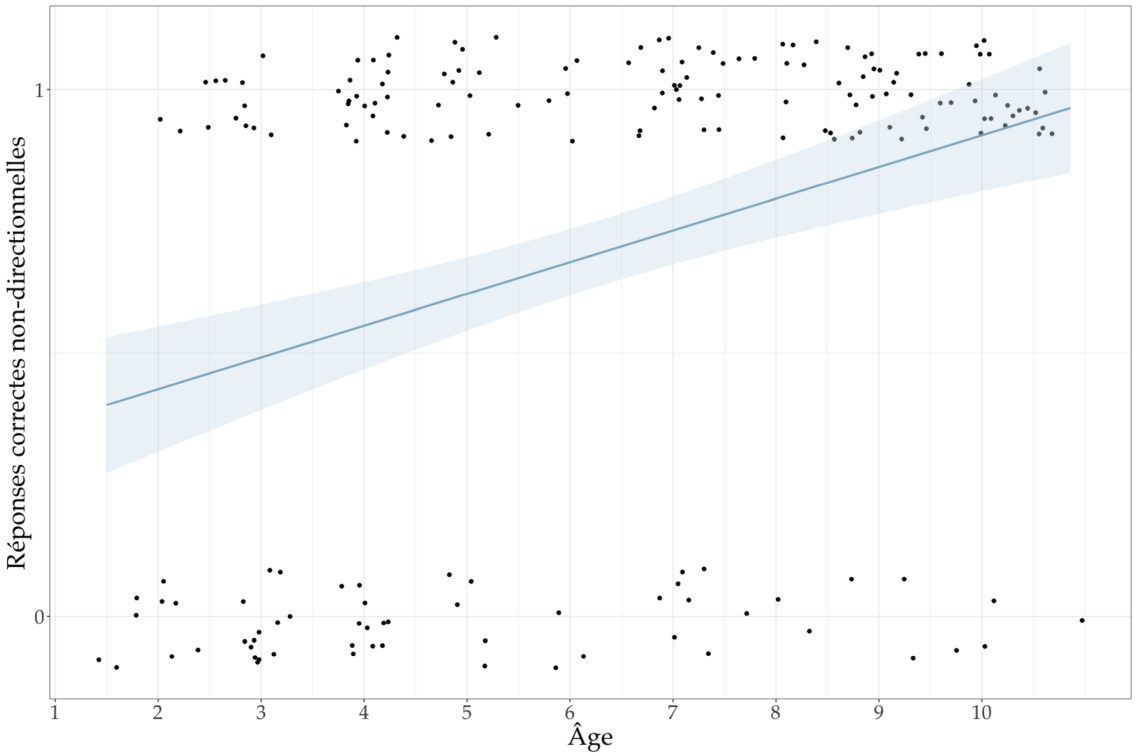


Figure B.2 – Corrélation entre les réponses correctes non-directionnelles et l'âge (à l'exclusion des adultes) dans l'Expérience 1. *Note.* Les réponses correctes non-directionnelles ont été codées 1 lorsque les participants ont choisi la deuxième boîte, quel que soit le point de départ adopté en condition horizontale (réponses congruentes et inverses), contre 0 pour les autres boîtes (réponses incongruentes). Chaque point de donnée sur le graphique correspond à un participant. Une dispersion aléatoire (ou *jittering*) a été ajoutée sur les points de données pour éviter les chevauchements. Pour cette raison, les données sont dispersées autour des valeurs 0 et 1.

Tableau B.2 – Résultats de la régression logistique comparant les réponses congruentes et inverses en fonction du groupe d'âge et de l'Expérience (1 *vs.* 2)

	Estimation	ES	z	p
Réponses congruentes				
Constante	-0.29	0.19	-1.47	.140
Expérience	-0.32	0.19	1.66	.097
Groupe d'âge	-0.05	0.19	0.26	.793
Expérience * Groupe d'âge	0.44	0.19	2.30	.021
Réponses inverses				
Constante	-0.49	0.20	-2.52	.012
Expérience	0.14	0.20	0.73	.465
Groupe d'âge	-0.46	0.20	-2.36	.018
Expérience * Groupe d'âge	-0.36	0.20	-1.82	.068

Tableau B.3 – Résultats de l'analyse log-linéaire effectuée sur la distribution des réponses en fonction de la condition (Occulteur *vs.* Translation) et du groupe d'âge dans l'Expérience 4

	ddl	L	p
Réponse	2	173.79	$< .001$
Condition	1	2.01	.157
Groupe d'âge	7	24.08	.001
Condition * Réponse	2	26.49	$< .001$
Groupe d'âge * Réponse	14	41.19	$< .001$
Condition * Groupe d'âge	7	1.30	.999
Condition * Groupe d'âge * Réponse	14	8.03	.888

Tableau B.4 – Distribution des réponses pour chaque groupe d'âge dans la condition Occulteur et dans la condition Translation de l'Expérience 4 pour les participants M_+ uniquement

Groupe	N	Congruente	Incongruente	Inverse	p-valeur Congruente *vs.* Inverse
			Condition Occulteur		
MS	22	11 (50%)*	4 (18%)	7 (32%)	$p = .24,\ h = 0.16$
GS	30	17 (57%)*	3 (10%)	10 (33%)	$p = .124,\ h = 0.19$
CP	24	9 (38%)*	0 (0%)	15 (62%)	$p = .154,\ h = 0.18$
CE1	24	15 (63%)*	2 (8%)	7 (29%)	$p = .067,\ h = 0.26$
CE2	17	8 (47%)*	0 (0%)	9 (53%)	$p = .5,\ h = 0.04$
CM1	24	17 (71%)*	1 (4%)	6 (25%)	$p = .017,\ h = 0.35$
CM2	33	19 (58%)*	0 (0%)	14 (42%)	$p = .243,\ h = 0.11$
Adultes	48	29 (60%)*	1 (2%)	18 (38%)	$p = .072,\ h = 0.17$
			Condition Translation		
MS	18	14 (78%)*	1 (5%)	3 (17%)	$p = .006,\ h = 0.50$
GS	29	16 (55%)*	6 (21%)	7 (24%)	$p = .046,\ h = 0.28$
CP	26	17 (65%)*	1 (4%)	8 (31%)	$p = .054,\ h = 0.26$
CE1	25	20 (80%)*	1 (4%)	4 (16%)	$p < .001,\ h = 0.52$
CE2	22	15 (68%)*	3 (14%)	4 (18%)	$p = .009,\ h = 0.44$
CM1	29	19 (65%)*	6 (21%)	4 (14%)	$p = .001,\ h = 0.50$
CM2	32	19 (59%)*	5 (16%)	8 (25%)	$p = .026,\ h = 0.30$
Adultes	44	33 (75%)*	3 (7%)	8 (18%)	$p < .001,\ h = 0.46$

Note. Le test binomial comparant les réponses congruentes à l'ensemble des autres réponses est basé sur une probabilité théorique de $\pi = \frac{1}{6}$. Les valeurs suivies d'une $*$ sont celles ayant atteint la significativité pour ce test. Le test opposant la proportion de réponses congruentes à la proportion de réponses inverses est basé sur une probabilité de $\pi = \frac{1}{2}$. Le seuil de la valeur p a été fixé à $\frac{.05}{8} = .006$ après une correction de Bonferroni. La valeur h correspond à la taille de l'effet évaluée par un h de Cohen.

Tableau B.5 – Résultats de l'analyse log-linéaire comparant la distribution des réponses congruentes, inverses et incongruentes en fonction de l'Expérience (1 *vs.* 4) et du groupe d'âge

		ddl	L	p
Condition Occulteur				
	Réponse	2	97.98	$< .001$
	Expérience	1	20.24	$< .001$
	Groupe d'âge	5	67.88	$< .001$
	Réponse * Expérience	2	12.66	.002
	Réponse * Groupe d'âge	10	44.06	$< .001$
	Expérience * Groupe d'âge	5	14.96	.011
	Réponse * Expérience * Groupe d'âge	10	17.80	.058
Condition Translation				
	Réponse	2	86.18	$< .001$
	Expérience	1	9.53	.002
	Groupe d'âge	5	60.62	$< .001$
	Réponse * Expérience	2	19.40	$< .001$
	Réponse * Groupe d'âge	10	34.80	$< .001$
	Expérience * Groupe d'âge	5	14.93	.011
	Réponse * Expérience * Groupe d'âge	10	11.69	.306

Tableau B.6 – Résultats de l'analyse log-linéaire comparant la distribution des réponses congruentes, inverses et incongruentes en fonction de l'Expérience (2 *vs.* 4) et du groupe d'âge

		ddl	L	p
Condition Occulteur				
	Réponse	2	30.59	$< .001$
	Expérience	1	4.46	.035
	Groupe d'âge	1	0.06	.801
	Réponse * Expérience	2	0.06	.971
	Réponse * Groupe d'âge	2	21.49	$< .001$
	Expérience * Groupe d'âge	1	0.13	.717
	Réponse * Expérience * Groupe d'âge	2	1.70	.428
Condition Translation				
	Réponse	2	20.31	$< .001$
	Expérience	1	1.13	.288
	Groupe d'âge	1	0.50	.479
	Réponse * Expérience	2	2.18	.336
	Réponse * Groupe d'âge	2	9.82	.007
	Expérience * Groupe d'âge	1	0.11	.741
	Réponse * Expérience * Groupe d'âge	2	5.42	.067

Tableau B.7 – Résultats de la correction de Benjamini et Hochberg (1995) sur les valeurs p observées pour le test binomial opposant les choix congruents aux choix inverse dans la condition Translation de l'Expérience 4

Groupe	Rang	p observé	p critique	Significativité
Adultes	1	.0001	.0063	*
CE1	2	.0005	.0125	*
CM1	3	.0008	.0188	*
CE2	4	.0059	.0250	*
MS	5	.0096	.0313	*
GS	6	.0378	.0375	NS
CM2	7	.0436	.0438	NS
CP	8	.0843	.0500	NS

Mini-étude 1

Exploration des préférences motrices de rotation chez l'adulte

Abstract Cette étude propose d'investiguer les habitudes motrices liées à la rotation d'objet, en lien avec les hypothèses proposées dans la discussion de l'Expérience 3. Pour rappel, nous suggérions que des habitudes motrices de rotation antihoraire puissent constituer un facteur de confusion dans la mesure d'un biais spatial gauche-droite. Afin d'étayer ces hypothèses, cette courte expérience a permis d'explorer les préférences motrices des participants lors d'une rotation à 90° de deux objets du quotidien : une feuille de papier et un téléphone portable. Trente adultes (âge moyen = 25 ans, ET = 6.4, 25 femmes, 27 droitiers) ont été invités à effectuer ces rotations en transposant chaque objet d'un plan sagittal à un plan horizontal. Que ce soit pour la feuille de papier ou pour le téléphone portable, une préférence significative en faveur d'une rotation antihoraire a été mise en évidence dans nos résultats (70% et 83% des réponses respectivement). Nous avons par ailleurs tenté de lier cette préférence à la latéralité des participants dans une analyse exploratoire. Bien que marginalement significatifs, nos résultats montrent que la probabilité d'effectuer une rotation antihoraire augmente à mesure que le degré de latéralité en faveur de la main droite s'accentue. Bien que ce résultat soit en accord avec des études plus générales sur la motricité globale, nous suggérons qu'un échantillon plus large de gauchers, couplé à des ajustements méthodologiques, soit nécessaire pour étayer nos conclusions dans de futures études.

Cadre théorique et objectifs

Que ce soit en motricité globale ou en motricité fine, deux directions prédéterminées s'offrent au choix lorsque l'individu opère un mouvement rotatif : la rotation horaire, orientée vers la droite du point de vue d'un observateur statique placé sur l'axe de rotation (voir la Figure B.3) ; et la rotation antihoraire, orientée vers la gauche. Si l'on devait spéculer sur la direction la plus fréquemment adoptée lors de nos gestes rotatifs, il serait probable que la rotation horaire soit retenue, tant elle apparaît comme dominante dans nos activités quotidiennes. Tirant son nom de l'observation du mouvement apparent du soleil sur les premiers cadrans horizontaux construits dans l'hémisphère nord (Rohr, 1996), le sens horaire matérialise généralement l'écoulement naturel du temps dans l'inconscient collectif. Ce sens se manifeste également dans de nombreux gestes du quotidien, que ce soit pour augmenter le volume d'un dispositif *via* un bouton rotatif, ou pour visser une ampoule, un couvercle ou un bouchon de bouteille. De plus,

le sens horaire semble dominer dans la structuration des tours de parole et des tours de jeu dans bon nombre de nos activités collectives. Bien que les causes de ce sens puissent être diverses (par exemple, la force est décuplée en pronation, un mouvement que l'on effectue lorsque l'on visse un objet), la rotation horaire est donc répandue dans diverses situations de la vie quotidienne.

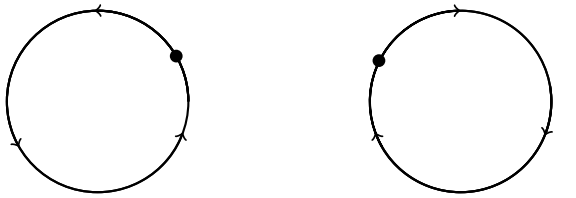


Figure B.3 – Exemple d'un axe de rotation antihoraire *vs.* horaire *Note.* Le point noir placé sur l'axe de rotation représente un observateur statique, pour qui une rotation antihoraire sera orientée vers la gauche, et une rotation horaire vers la droite.

Il s'avère pourtant que la rotation antihoraire est loin d'être absente de notre quotidien. Un exemple évident en est le sens du dévissage de ces mêmes ampoules, couvercles ou bouchons, où un mouvement orienté vers la gauche devient nécessaire. Pour des individus droitiers, il constitue aussi le seul sens possible pour verser le liquide d'un récipient. La prééminence de ce sens de rotation devient d'autant plus apparente lorsque l'on se focalise sur la manière dont les individus se déplacent dans leur environnement en l'absence de toute contrainte. Des études montrent par exemple que lorsqu'il lui est demandé de courir en suivant un trajet circulaire, un individu s'orientera préférentiellement dans un sens antihoraire. Cette préférence s'observe non seulement chez des coureurs athlètes (pour qui l'expression « courir contre la montre » prend tout son sens, voir Tavakkoli & Jose, 2013) mais aussi dans la population en général (Toussaint & Fagard, 2008). L'existence d'un biais antihoraire dans la motricité globale des individus (courir dans un espace circulaire, mais aussi tourner sur une chaise, autour d'un objet ou autour de soi-même) est une hypothèse soutenue par de nombreux travaux (Gordon et al., 1992 ; Lenoir et al., 2006 ; Mohr et al., 2003, 2004 ; Previc & Saucedo, 1992 ; Seltzer et al., 1990 ; Taylor et al., 2007 ; Yazgan et al., 1996), malgré l'existence de quelques études contradictoires (voir par exemple Bradshaw & Bradshaw, 1988 ; ou encore Stochl & Croudace, 2013, bien que le biais ait ici été mesuré par un questionnaire en ligne, à la différence de la plupart des études). Lorsqu'il en vient à déambuler, l'individu tend également à le faire dans un sens contraire aux aiguilles d'une montre, qu'il soit dans un musée ou sur le pont d'un bateau (voir Bradshaw & Bradshaw, 1988, p.232). Cette tendance est par ailleurs visible dès l'enfance, comme l'ont montré des études réalisées chez des participants âgés entre trois et treize ans (Day & Day, 1997 ; Gospe Jr et al., 1990 ; Güneş & Nalçaci, 2006 ; Streuli et al., 2017).

Dans la discussion de l'Expérience 3, nous proposions que des habitudes motrices de rotation antihoraire pourraient interférer avec la mesure d'un biais spatial lors de la lecture d'une série de boîtes transposée d'un plan sagittal à un plan horizontal. Nous supposions que cette rotation antihoraire aurait pu être présente chez la plupart de nos participants, justifiant l'absence d'effet dans nos résultats. Pourtant, alors que nous savons que l'individu tend à favoriser ce sens de rotation dans ses déplacements, peu d'éléments sont à ce jour disponibles dans la littérature pour nous permettre d'inférer son comportement dans le cas de la manipulation d'objets. Sur le plan de la motricité fine, il est par ailleurs connu que des mouvements circulaires antihoraires sont largement recrutés pour des gestes minutieux comme l'écriture, et sont entraînés par des exercices spécifiques destinés aux futurs scripteurs (voir par exemple Fischer, 2022, p.110). Cependant, des tracés plus libres tels que le gribouillage ou le dessin spontané semblent prendre une direction opposée, comme le suggère l'étude de Thomassen et Tuelings (1979). L'absence de données sur les comportements rotatifs appliqués à des objets, combinée aux divergences dans les résultats existants pour la motricité fine a ainsi conduit à l'élaboration de cette étude. Notre principal objectif était de mesurer les habitudes de rotation appliquées à des objets du quotidien, en supposant que le sens de rotation privilégié serait congruent avec l'orientation déjà observée pour des tâches de motricité globale. Ainsi, nous nous attendions à observer une préférence franche en faveur d'une rotation antihoraire, et ce, quel que soit le type d'objet manipulé par l'individu. De tels résultats permettraient, à terme, de mieux comprendre les contextes dans lesquels s'expriment les biais rotatifs, mais aussi de mieux préciser notre hypothèse interprétative formulée à l'égard des résultats de l'Expérience 3.

Méthode

Participants L'échantillon regroupait 31 étudiants en troisième année de Psychologie inscrits au sein de l'Université Côte d'Azur. Seul un participant a été exclu des analyses en raison d'un trouble dyspraxique. Sur les 30 participants restants (âge moyen = 25 ans, $ET = 6.4$), 26 avaient le Français pour langue maternelle. Les autres participants parlaient respectivement l'Anglais, le Portugais, le Kurde et le Créole. L'échantillon comptait 27 droitiers, deux gauchers et un ambidextre, pour un total de 25 femmes et cinq hommes. Un χ^2 d'adéquation a été réalisé pour comparer les proportions de participants droitiers (93%) et gauchers (7%) de notre échantillon à celles attendues dans la population (90% de droitiers et 10% de gauchers selon la méta-analyse de Papadatou-Pastou et al., 2020, notre participant ambidextre ayant par ailleurs été écarté de ce comptage pour mieux correspondre aux proportions binaires fournies dans l'article). En raison d'un effectif théorique < 5 dans au moins une des cellules, un tirage aléatoire de Monte Carlo (Hope, 1968 ; Manly, 2018) a été utilisé, permettant

ainsi d'estimer la significativité de la statistique du χ^2 sur la base de 10 000 simulations. Les résultats ont indiqué que la proportion de droitiers et de gauchers dans cette étude était conforme à celle attendue dans la population ($\chi^2 = 0.31$, $p = .771$), permettant la généralisation de nos résultats principaux.

Matériel et procédure Les participants ont été rencontrés collectivement au sein de deux salles de classe de l'Université. Chaque participant était assis en face d'une table (de 50 à 80 cm de large, en fonction de la salle). L'expérimentateur informait les participants qu'ils allaient réaliser une série d'exercices brefs et faciles, et leur demandait d'exécuter ces exercices aussi naturellement que possible. En amont de la tâche, il était demandé à chaque participant de s'assurer qu'aucun objet n'était présent sur la table, et qu'ils étaient en mesure d'écarter le bras gauche et le bras droit sans rencontrer d'obstacle. L'expérimentateur expliquait que les participants auraient besoin d'avoir facilement accès à un stylo et à leur téléphone. Les participants devaient donc garder ces deux objets à proximité, par exemple dans leur poche ou dans leur sac placé à leurs pieds. L'expérimentateur s'assurait du bon respect de ces consignes avant de débuter la passation.

La première étape consistait à distribuer les formulaires de consentement aux participants. Ce formulaire comportait une case noire visible en bas à droite de la feuille. Après avoir parcouru le contenu du document avec les participants, l'expérimentateur leur demandait de signer impérativement dans cette case noire. Les participants étaient prévenus que la tâche expérimentale démarrait au moment même où les participants apposaient leur signature sur le document. Une fois le document signé, les participants devaient placer leur stylo dans leur poche ou leur sac, et garder le formulaire devant eux. L'expérimentateur montrait alors au tableau un diaporama sur lequel figurait une copie du formulaire de consentement, orienté en mode portrait, avec la case noire en bas à droite. L'expérimentateur expliquait aux participants qu'ils avaient devant eux le dit formulaire « orienté de la même manière qu'à l'écran ». Il précisait par ailleurs que si tel n'était pas le cas, les participants avaient quelques minutes pour rectifier le placement de la feuille. Ensuite, l'expérimentateur affichait au centre de l'écran un rectangle bleu d'environ 100 cm de longueur et 45 cm de largeur (*cf.* la Figure B.4). L'expérimentateur expliquait alors aux participants que leur formulaire de consentement était orienté « en mode portrait, comme le rectangle à l'écran ». Il changeait ensuite de diapositive pour montrer le même rectangle (toujours placé au centre de l'écran), mais cette fois-ci tourné à 90°. Il leur demandait alors de « placer la feuille de consentement en mode paysage à la manière du rectangle à l'écran ». Une fois la rotation effectuée par les participants, il leur était demandé de mettre la feuille dans un coin de la table et de ne plus y prêter attention.

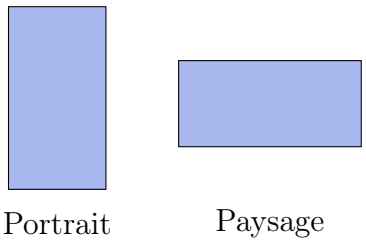


Figure B.4 – Illustration des rectangles projetés à l'écran lors de l'exercice de rotation de la Mini-étude 1. *Note.* Chaque rectangle était présenté sur une diapositive distincte dans l'objectif d'illustrer soit une orientation portrait, soit une orientation paysage.

En deuxième lieu, l'expérimentateur demandait aux participants de sortir leur téléphone portable et d'interagir rapidement avec l'objet (en ouvrant par exemple quelques applications ou en répondant à un SMS). L'expérimentateur affichait alors une nouvelle diapositive sur laquelle figurait l'icône d'un téléphone orienté verticalement. L'expérimentateur disait que les participants devaient tenir leur téléphone orienté de la sorte dans leurs mains, et s'assurait que l'appareil était tenu en l'air et non manipulé sur la table. De nouveau, le même rectangle bleu était affiché au tableau, et l'expérimentateur expliquait que le téléphone des participants « était orienté en mode portrait comme le rectangle à l'écran ». Il leur demandait ensuite de « placer leur téléphone en mode paysage » tout en affichant une diapositive montrant le rectangle bleu tourné à 90°. Une fois la rotation effectuée, les participants devaient poser leur téléphone sur la table, par-dessus le formulaire de consentement, et étaient invités à ne plus toucher à ces deux objets.

En dernier lieu, l'expérimentateur distribuait un questionnaire visant à recueillir des informations concernant les rotations tout juste effectuées. Les participants devaient tout d'abord indiquer la manière dont ils avaient tourné le formulaire de consentement en précisant de quel côté se situait le carré noir dans lequel ils avaient apposé leur signature (ce point de repère étant initialement placé en bas de la feuille avant la rotation). Le type de rotation a été coté en fonction de l'emplacement du repère en modalité horizontale : « Horaire » lorsque le repère était situé à gauche du participant, et « Antihoraire » lorsque le repère était situé à droite. Les participants ont été interrogés de manière similaire concernant la rotation de leur téléphone, en indiquant si le port de charge (considéré comme point de repère) se trouvait à leur gauche ou à leur droite. Ils devaient également préciser l'emplacement habituel de ce point de repère lorsque leur téléphone est orienté en mode portrait. Le type de rotation a été déterminé en fonction de ces deux critères. Par exemple, la rotation a été cotée comme « Antihoraire » lorsqu'un port de charge situé en bas du téléphone en mode portrait était basculé à droite. Inversement, la rotation a été cotée comme « Horaire » lorsqu'un port de charge situé en bas du téléphone en mode portrait était basculé à gauche. Des

questions additionnelles ont été posées afin d'identifier la position du bouton de volume et du bouton marche/arrêt sur les téléphones des participants. Afin de limiter les erreurs de réponse (les participants ne devant pas manipuler leur téléphone pendant la phase de questions), seule la position finale de ces boutons a été demandée. Les participants devaient donc indiquer si chacun se trouvait en haut ou en bas de leur téléphone orienté en mode paysage. Par la suite, la position initiale de ces boutons a été recodée en fonction du sens de rotation appliqué. Ainsi, si une rotation antihoraire plaçait un bouton vers le bas, alors sa position initiale était considérée comme étant à gauche du téléphone ; si cette même rotation le plaçait plutôt vers le haut, alors la position initiale du bouton était notée comme étant à droite. La démarche inverse a été appliquée dans le cas d'une rotation horaire.

Avant de terminer la passation, un questionnaire de latéralité a été administré aux participants. Dans ce questionnaire, inspiré du *Edinburgh Handedness Inventory* (voir Oldfield, 1971), il leur était demandé de préciser la main qu'ils préféraient utiliser (gauche, droite ou indifférent) pour réaliser les actions listées ci-dessous :

- ☐ Écrire
- ☐ Dessiner
- ☐ Jeter un objet
- ☐ Utiliser une paire de ciseaux
- ☐ Se brosser les dents
- ☐ Couper avec un couteau (sans fourchette)
- ☐ Utiliser une cuillère
- ☐ Utiliser un balai (main placée au-dessus)
- ☐ Gratter une allumette (main qui tient l'allumette)
- ☐ Ouvrir un pot de confiture (main qui enlève le capuchon)
- ☐ Utiliser une télécommande
- ☐ Utiliser un téléphone

Outre ce questionnaire, les participants ont également indiqué de manière plus générale quelle main ils considéraient comme étant leur main dominante.

Résultats

Analyse principale Sur le plan descriptif, les résultats ont indiqué une préférence pour la rotation antihoraire quel que soit l'objet considéré (*cf.* la Figure B.5). Lorsque les participants devaient tourner la feuille de papier, seulement 30% ont opté pour une rotation horaire, tandis que 70% ont opté pour une rotation antihoraire. Le même pattern a été retrouvé pour la rotation du téléphone, 83% des participants ayant tourné l'objet dans un sens antihoraire, contre seulement 17% pour le sens horaire. Des tests binomiaux bilatéraux ont été effectués afin de déterminer si les distributions de réponses entre les deux types de rotation différaient significativement d'une répartition aléatoire (basée sur une probabilité théorique de $\pi = \frac{1}{2}$). Les résultats se sont avérés significatifs, à la fois pour la rotation du formulaire papier (21 réponses antihoraires sur 30 réponses totales, $p = .04$, h de Cohen $= 0.29$) ; et pour le téléphone (25 réponses antihoraires sur 30 réponses totales, $p < .001$, h de Cohen $= 0.52$).

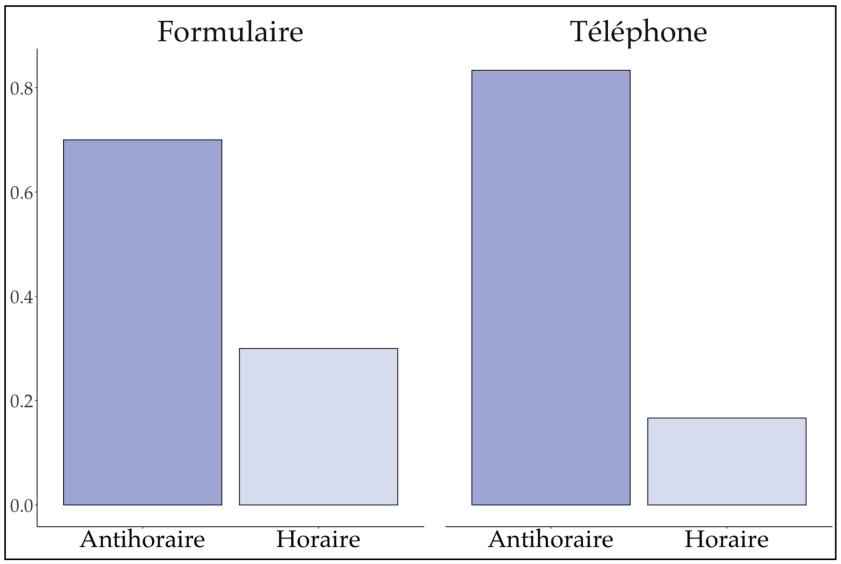


Figure B.5 – Répartition des types de rotation effectuées en fonction de l'objet manipulé dans la Mini-étude 1

Un χ^2 de McNemar a ensuite été effectué sur le Tableau de contingence B.8 afin de déterminer si les rotations effectuées par les participants différaient significativement entre les deux objets. Le test s'est révélé non significatif $\chi^2(1) = 1.5$, $p = .22$), indiquant une consistance (par ailleurs modérée) entre les deux rotations (κ de Cohen = .46).

Tableau B.8 – Tableau de contingence des rotations appliquées respectivement au formulaire papier et au téléphone portable par les participants de la Mini-étude 1

	Rotation du téléphone	
Rotation du formulaire	Horaire	Antihoraire
Horaire	4 (44%)	5 (56%)
Antihoraire	1 (5%)	20 (95%)

En complément, la rotation appliquée sur le téléphone a été analysée plus en détail dans l'objectif d'étudier si elle pouvait être liée à des facteurs ergonomiques (les participants ayant par exemple pu privilégier une rotation qui placerait les boutons de volume ou marche/arrêt dans une position particulière, facilitant l'utilisation du téléphone en mode paysage). Les analyses ont premièrement indiqué que la position initiale des boutons de volume ne déterminait pas le type de rotation choisie, les participants ayant majoritairement effectué une rotation antihoraire, que leur bouton de volume soit placé à gauche ou à droite de leur téléphone en mode portrait ($p = 1$ après un test exact de Fisher, voir le Tableau B.9). Néanmoins, une relation significative a été mise en évidence pour le bouton marche/arrêt ($p = .023$). En effet, les résultats indiquent que les participants ayant ce bouton à droite de leur téléphone ont privilégié une rotation antihoraire, tandis que les participants ayant ce bouton à gauche ont tous exécuté

une rotation horaire (voir le Tableau B.9). Dans les deux cas, le bouton marche/arrêt était ainsi basculé en haut du téléphone, suggérant un choix ergonomique quant à la rotation appliquée (une tendance devant par ailleurs être interprétée avec prudence, en raison du très faible nombre de participants retrouvés dans la modalité « gauche »).

Ces analyses principales ont également été conduites en écartant le participant ambidextre. Aucun changement dans le pattern de résultat n'a été observé suite à l'exclusion de ce participant.

Tableau B.9 – Tableau de contingence des rotations appliquées au téléphone portable en fonction de la position initiale des boutons de volumes et marche/arrêt dans la Mini-étude 1

Position du bouton	Horaire	Antihoraire
	Bouton de volume	
Gauche	4 (18%)	18 (82%)
Droite	1 (13%)	7 (87%)
	Bouton marche/arrêt	
Gauche	2 (100%)	0 (0%)
Droite	3 (11%)	25 (89%)

Analyse exploratoire Dans un dernier temps, un effet de la latéralité sur le sens de rotation a été testé pour chaque type d'objet. Le but de cette analyse était d'apporter un premier regard sur les facteurs pouvant expliquer les préférences de rotation observées dans nos résultats, de la même manière que des études précédentes ont tenté d'expliquer des préférences observées pour des tâches en motricité globale (voir par exemple Bradshaw & Bradshaw, 1988 ; Mohr et al., 2003 ; Stochl & Croudace, 2013). Cette analyse reste purement exploratoire du fait d'un nombre déséquilibré de participants respectivement droitiers, gauchers et ambidextres (des proportions que nous voulions justement proches de celles retrouvées dans la population pour mieux généraliser nos résultats principaux). De manière descriptive, les résultats suggèrent des divergences dans la rotation appliquée en fonction de la latéralité des participants. Pour les droitiers, une plus forte proportion de réponses antihoraires a été observée, à la fois pour la rotation du formulaire (74% contre 26%) et pour la rotation du téléphone (89% contre 11%). Les gauchers n'ont par ailleurs pas montré de préférence entre les deux types de rotation, les choix horaires et antihoraires étant strictement équivalents pour le formulaire ainsi que pour le téléphone portable. Enfin, le seul participant ambidextre a opté pour une rotation horaire pour les deux objets. Un test exact de Fisher (effectué en raison d'un effectif < 5 dans au moins une des cellules) a permis de comparer les proportions de réponses horaires et antihoraires en fonction de la latéralité des participants. Les résultats n'ont pas indiqué de différence significative

dans les pratiques de rotation selon la latéralité pour le formulaire papier ($p = .207$), et seule une tendance marginalement significative a pu être mise en évidence pour la rotation du téléphone ($p = .064$). Le pattern de résultats est resté par ailleurs inchangé en excluant le participant ambidextre ($p = .483$ pour le formulaire et $p = .261$ pour le téléphone).

Afin de permettre une analyse plus fine, les réponses obtenues pour chaque question du test de latéralité ont été transformées en scores numériques. Lorsque les participants indiquaient utiliser préférentiellement leur main droite pour exécuter une tâche donnée, un score de 1 était attribué. À l'inverse, un score de -1 était coté lorsque la main gauche était indiquée. Pour toute réponse indifférente, un score de 0 a été attribué. Ainsi, des valeurs positives rendaient compte d'une préférence en faveur de la main droite (avec un score maximal de 12 pour une préférence parfaite) tandis que des valeurs négatives indiquaient une préférence en faveur de la main gauche (pour un score maximal de -12). Un score de 0 indiquait quant à lui une égalité dans l'utilisation des deux mains. Le score de latéralité moyen était de 9.4 ($ET = 5.96$, $Min =$ -12, $Max = 12$) et le score médian de 11.5 (*1er Quartile* = 10, *3ème Quartile* = 12). Un modèle de régression logistique a été calculé pour prédire la probabilité d'effectuer une rotation antihoraire (notée 1, contre 0 pour une rotation horaire) selon la valeur du score de latéralité pour chaque objet manipulé. Les résultats n'ont pas montré d'effet significatif de la latéralité que ce soit pour la rotation effectuée sur le formulaire papier ($z = 0.99$, $p = .322$, $\beta Std. = 0.38$) ou sur le téléphone ($z = 1.40$, $p = .163$, $\beta Std. = 0.55$). Un test de rapport de vraisemblance a ensuite été effectué pour comparer chaque modèle incluant l'effet de la latéralité ($M1$) à un modèle nul ne contenant que la constante ($M0$), sur la base de leur AIC (*Akaike Information Criterion*, voir Akaike, 1974 ; Burnham & Anderson, 2004 ; Burnham et al., 2011). Les résultats n'ont pas indiqué de différence significative entre les modèles à la fois pour la rotation du formulaire ($AIC_{M0} = 38.65$ *vs.* $AIC_{M1} = 39.63$, $\chi^2(1) = 1.02, p = .313$) et la rotation du téléphone ($AIC_{M0} = 29.03$ *vs.* $AIC_{M1} = 29.15$, $\chi^2(1) = 1.88, p = .170$).

La même analyse a été conduite en écartant les données négatives, identifiées comme valeurs extrêmes dans la distribution des scores. Sur la base de ce nouveau jeu de données, un résultat marginalement significatif a pu être trouvé pour la rotation du formulaire ($z = 1.84$, $p = .066$, $\beta Std. = 0.87$), le modèle ajusté expliquant significativement mieux les données que le modèle nul ($AIC_{M0} = 35.50$ *vs.* $AIC_{M1} = 33.55$, $\chi^2(1) = 3.95, p = .046$). Ces résultats suggèrent qu'une préférence en faveur de la main droite pourrait être associée à une probabilité plus élevée d'effectuer une rotation antihoraire pour ce type de matériel (bien que cet effet doive être interprété avec prudence compte tenu de sa significativité statistique marginale). Les résultats sont identiques concernant la rotation du téléphone, ne suggérant aucune influence du degré de préférence pour la main droite sur les habitudes de rotation pour ce type d'objet ($z = 1.39$,

$p = .164$, $\beta Std. = 0.72$) ; ($AIC_{M0} = 24.97$ *vs.* $AIC_{M1} = 24.95$, $\chi^2(1) = 2.01$, $p = .156$).

Discussion

L'objectif de cette étude était d'analyser le type de mouvement rotatif spontanément exécuté par un individu manipulant un objet du quotidien. Nous avions émis l'hypothèse qu'une rotation antihoraire serait prévalente dans nos résultats, en lien avec la littérature existante sur les biais rotatifs en motricité globale. Dans notre protocole, un échantillon de 30 adultes devait faire pivoter deux objets – un formulaire papier et un téléphone – d'un plan sagittal[1] à un plan horizontal. Conformément à nos attentes, les résultats ont montré que le sens antihoraire était préférentiellement utilisé pour la rotation de ces objets. Ces résultats concordent avec les biais antihoraires observés lorsque l'individu exécute des déplacements dans un espace circulaire, des rotations autour d'un objet ou encore des rotations autour de son axe corporel (Gordon et al., 1992 ; Lenoir et al., 2006 ; Mohr et al., 2003, 2004 ; Previc & Saucedo, 1992 ; Seltzer et al., 1990 ; Taylor et al., 2007 ; Yazgan et al., 1996). Ainsi, notre étude suggère que ces schèmes directionnels ne sont pas exclusifs aux mouvements globaux du corps, mais qu'ils s'étendent également à la manipulation d'objets.

Thomassen et Tuelings (1979) ont par ailleurs montré que des gestes moteurs recrutés dans l'écriture font également majoritairement appel à ces rotations antihoraires, tandis que des tracés plus spontanés tendent à s'orienter dans le sens inverse. Il semble donc que des divergences puissent résider dans la manière de recruter ces rotations, celles-ci pouvant s'ajuster aux exigences fonctionnelles propres à chaque tâche. Par conséquent, il serait judicieux de questionner la stabilité et la généralité du biais antihoraire lorsqu'il est mesuré différemment. Par exemple, cette étude se voulait la plus écologique possible, justifiant l'utilisation d'objets de la vie quotidienne dans notre protocole. En ce sens, la rotation antihoraire détectée dans notre étude pourrait ne pas rendre compte d'un biais pur, mais d'une préférence ergonomique directement liée au matériel utilisé. Par exemple, la rotation d'un téléphone dans un sens donné pourrait faciliter l'utilisation de boutons spécifiques, qui deviendraient moins accessibles dans le cas d'une rotation inverse. Cette idée concorde avec nos résultats, qui suggèrent que les participants auraient en majorité placé le bouton marche/arrêt de leur téléphone en position supérieure, en appliquant une rotation antihoraire lorsque celui-ci était placé à droite de leur téléphone, ou une rotation horaire lorsqu'il était placé à gauche. Cependant, cette interprétation doit être considérée avec prudence dans la mesure où les

[1] Le terme sagittal est ici employé pour les deux objets, mais il est à noter que leur orientation différait légèrement. En effet, le téléphone était tenu davantage dans une position intermédiaire, entre le plan vertical et le plan sagittal.

participants pour lesquels ce bouton était situé du côté gauche étaient trop rares dans notre échantillon, ce qui limite la généralisation de nos résultats à ce cas de figure. De futures études pourraient s'attacher à mieux contrôler ce facteur afin d'en isoler l'influence sur les biais rotatifs observés pour un matériel électronique.

En outre, si un lien avec des facteurs ergonomiques peut être envisagé pour la rotation du téléphone, le lien s'avère moins clair pour la rotation du formulaire papier. Une possibilité serait que les habitudes de lecture et d'écriture puisse sous-tendre la rotation antihoraire de ce type de matériel. Par exemple, un individu lisant ou écrivant un texte orienté en mode portrait commencera dans le coin supérieur gauche du support papier. En exécutant une rotation horaire de la feuille, le lecteur/scripteur tendrait à placer ce coin supérieur gauche à sa droite plutôt qu'à sa gauche, soit à l'opposé du point de départ habituel. Cette incongruence pourrait amener l'individu à privilégier une rotation antihoraire pour les supports en lien avec des activités de lecture et d'écriture. Les habitudes de rotation observées dans cette étude pourraient donc être également déterminées par des facteurs ergonomiques pour ce type de matériel. De plus, il convient de souligner que le matériel utilisé dans notre étude présentait également une asymétrie qui aurait pu influencer le sens de rotation adopté par les participants. En effet, rappelons que ces derniers devaient apposer leur signature dans un point de repère situé sur le côté inférieur *droit* de la feuille de papier. En ce sens, il ne peut être exclu qu'un tel repère n'ait pas constitué un point focal relativement saillant pour orienter la rotation de sorte que ce point de repère soit préférentiellement placé à droite du participant (rotation anti-horaire) plutôt qu'à sa gauche (rotation horaire). Pour ces raisons, il semble pertinent d'évaluer l'adoption d'une rotation antihoraire pour des stimuli contrôlés dans leur forme, leur couleur et leur orientation, mais aussi dépourvus de toute fonctionnalité. De telles manipulations pourraient permettre d'isoler les déterminants ergonomiques dans la rotation d'objet, pour identifier de manière plus fine les facteurs profonds de nature plus cognitive ou perceptive. Une autre variation méthodologique pourrait par ailleurs s'avérer pertinente pour affiner les résultats de la présente étude. En effet, notre tâche ne requérait qu'une rotation à 90° des objets manipulés, une condition que nous souhaitions spécifiquement étudier pour étayer les conclusions avancées dans la discussion de l'Expérience 3. Cependant, la question d'une préférence antihoraire pour des mouvements d'une plus grande amplitude – par exemple, impliquant des angles de rotation supérieurs ou une rotation continue – demeure ouverte. De futures études pourraient ainsi s'intéresser à ce critère afin de déterminer si le sens antihoraire transcende tout scénario de rotation ou s'il n'est spécifique qu'à un sous-ensemble restreint de tâches rotatives.

Dans la présente étude, nous proposions d'étudier le lien entre le type de rotation effectuée et la latéralité des participants par le biais d'une analyse exploratoire. En ne sélectionnant que les participants droitiers (majoritaires dans notre échantillon), nos

résultats ont suggéré que la probabilité d'exécuter une rotation antihoraire tendait à être associée à une préférence de plus en plus marquée pour la main droite. Ces résultats sont en opposition avec différents travaux portant sur la motricité globale, dans la mesure où certaines études n'ont pas rapporté de lien significatif entre latéralité et biais rotatifs (voir par exemple Day & Day, 1997) ; et que d'autres études ont pu montrer une association strictement inverse, à savoir une préférence pour des rotations horaires chez des participants droitiers (Bradshaw & Bradshaw, 1988 ; Stochl & Croudace, 2013). Pourtant, le fait que cette association entre latéralité à droite et rotation antihoraire ait par ailleurs été détectée dans d'autres études rend difficile l'adoption d'une conclusion univoque quant à la relation de ces deux facteurs (voir Mohr et al., 2003, 2004 ; Yazgan et al., 1996). Lenoir et al. (2006) proposait que ces divergences de résultats peuvent être expliquées par la diversité des méthodologies employées, à la fois pour mesurer les biais rotatifs (situations écologiques, mesures en laboratoire ou encore auto-questionnaire), mais aussi pour attester de la latéralité des participants (observations fines, auto-questionnaires détaillés, ou simple question fermée). La question donc de savoir si des individus tendent à exécuter des mouvements rotatifs dirigés du même côté de leur main dominante, ou au contraire, du côté opposé, demeure ouverte, même si les résultats de cette étude tendent à appuyer la deuxième hypothèse. Nous pensons cependant que nos conclusions pourraient être davantage étayées dans des travaux permettant une comparaison équilibrée entre une population droitière et une population gauchère (l'échantillon de cette étude ayant été construit sur la base des proportions de latéralité retrouvées dans la population, *cf.* Papadatou-Pastou et al., 2020). Par ailleurs, l'adoption d'une méthodologie unique dans la mesure des biais de rotation mais aussi de la latéralité des individus pourrait favoriser une meilleure comparabilité des résultats entre études.

En définitive, notre étude suggère que, chez une population adulte, la rotation d'objets du quotidien est préférentiellement réalisée dans un sens antihoraire, en accord avec des préférences déjà observées en motricité globale. Comme présenté dans l'introduction, ces biais moteurs globaux sont présents dès l'âge de trois ans (Day & Day, 1997). Cette similitude entre enfants et adultes dans le domaine de la motricité globale laisse à penser qu'un même parallèle pourrait être retrouvé entre ces deux populations pour la manipulation d'objets, bien que cette hypothèse nécessite d'être directement testée dans de futurs travaux. Par ailleurs, des études précédentes ont renseigné l'existence d'une interconnexion entre gestes moteurs et habiletés spatiales, notamment dans le cadre de tâches mobilisant la rotation mentale (voir par exemple Chu & Kita, 2011 ; Jansen & Kellner, 2015). De tels résultats viennent questionner la manière dont les biais rotatifs mesurés dans la présente étude pourraient également se retrouver dans des activités impliquant la manipulation mentale d'objets. En considérant que les capacités de rotation mentale prédisent la réussite dans différents domaines, notamment la

capacité à effectuer des tâches arithmétiques complexes (Cheng & Mix, 2014 ; Georges et al., 2019), il pourrait être pertinent d'investiguer : *i)* si une préférence pour la rotation antihoraire est retrouvée de manière congruente en situation physique et mentale *ii)* si une éventuelle dissonance entre ces deux modalités a des répercussions sur des fonctionnements cognitifs plus généraux (raisonnement fluide, traitement visuo-spatial, raisonnement logico-mathématique) *iii)* si un entraînement spécifique visant une coordination entre habitudes motrices et rotation mentale favorise de meilleures performances dans ces différents domaines.

Annexe C

Matériel supplémentaire du Chapitre 3

C.1 Expérience 5

Tableau C.1 – Caractéristiques des noms de fruits utilisés dans l'Expérience 5

Mot	Fréquence	Imageabilité	Âge d'acquisition	Nombre de syllabes
Banane	4.05	6.95	1.40	2
Cerise	3.31	6.84	1.57	2
Citron	9.05	6.95	1.66	2
Framboise	3.92	6.95	1.90	2
Grenade	6.49	6.32	3.54	2
Kiwi	0.07	6.8	-	2
Myrtille	0.34	-	-	2
Orange	12.03	6.88	1.40	2
Pastèque	1.62	4.56	2.29	2
Raisin	4.86	6.88	1.77	2

Note. La fréquence est tirée de la base de données Lexiques2 (New et al., 2004), et s'exprime en occurrence pour un million de mots dans 487 textes. L'imageabilité est tirée de Desrochers et Thompson (2009) et a été estimée sur une échelle en sept points par 72 participants. L'âge d'acquisition de chaque mot est tiré de la base de données IMABASE fournie par Bonin et al. (2020). Cette valeur correspond à une estimation effectuée sur une échelle en cinq points par 35 participants, à l'exception du mot « Framboise », dont l'âge d'acquisition est tiré de Bonin et al. (2003) et qui a été estimé par 97 participants sur une échelle en cinq points. Les tirets indiquent une information manquante pour les mots retenus dans notre étude.

Tableau C.2 – Nombre d'occurrences de chaque fruit par position pour la phase de mémorisation de la condition Multi-cibles de l'Expérience 5

	Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Total
Banane	4	3	3	3	13
Cerise	3	3	4	3	13
Citron	3	4	3	3	13
Framboise	4	2	3	4	13
Grenade	3	3	3	3	12
Kiwi	3	3	3	3	12
Myrtille	3	3	4	4	14
Orange	3	4	2	3	12
Pastèque	3	4	2	3	12
Raisin	3	4	3	3	13

Tableau C.3 – Nombre d'occurrences de chaque fruit par rang (R1 à R8) dans la série de sondes présentées lors de la phase de reconnaissance de la condition Multi-cibles dans l'Expérience 5

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	Total
Banane	3	3	2	4	4	4	2	4	26
Cerise	4	4	3	4	3	2	3	3	26
Citron	4	3	3	4	2	3	3	3	25
Framboise	3	3	3	2	3	3	4	3	24
Grenade	3	2	3	4	4	3	3	2	24
Kiwi	2	4	4	2	3	4	5	3	27
Myrtille	4	2	3	5	3	4	2	3	26
Orange	3	3	4	3	3	3	3	4	26
Pastèque	3	3	3	2	4	3	3	4	25
Raisin	3	5	4	2	3	3	4	3	27

Tableau C.4 – Pourcentage (et écart-type) de réponses correctes en fonction de la condition expérimentale dans l'Expérience 5, d'abord pour l'ensemble des sondes (cibles et leurres) puis pour les items cibles uniquement

		Image	Mot	Total
Cibles et leurres	Mono	94% (4%)	95% (5%)	94% (6%)
	Multi	96% (2%)	96% (3%)	96% (3%)
	Total	95% (3%)	95% (4%)	-
Cibles uniquement	Mono	93% (6%)	95% (6%)	94% (6%)
	Multi	94% (4%)	94% (4%)	94% (4%)
	Total	93% (5%)	94% (5%)	-

Tableau C.5 – Pourcentage (et écart-type) de réponses correctes obtenues pour chaque item dans l'Expérience 5, selon le type de stimulus et tout type de stimulus confondu, d'abord pour l'ensemble des sondes (cibles et leurres) puis pour les items cibles uniquement

Item	Leurres et cibles			Cibles uniquement		
	Image	Mot	Total	Image	Mot	Total
Banane	94.8% (6.4%)	94.7% (7.2%)	94.7% (6.8%)	93.6% (10.5%)	93.3% (11.9%)	93.4% (11.2%)
Cerise	94.6% (7.7%)	93.7% (10.6%)	94.1% (9.2%)	88.5% (20.5%)	94.3% (11.9%)	91.4% (17.0%)
Citron	94.9% (6.9%)	95.4% (7.3%)	95.1% (7.0%)	94.9% (13.3%)	93.4% (18.0%)	94.1% (15.8%)
Framboise	94.6% (7.7%)	95.6% (8.3%)	95.1% (8.0%)	92.7% (12.7%)	94.7% (10.3%)	93.7% (11.5%)
Grenade	96.1% (5.8%)	94.2% (10.3%)	95.2% (8.4%)	96.1% (7.8%)	92.7% (10.8%)	94.4% (9.5%)
Kiwi	94.1% (8.5%)	96.0% (5.7%)	95.1% (7.3%)	92.7% (11.5%)	95.9% (7.7%)	94.3% (9.9%)
Myrtille	95.3% (6.8%)	95.9% (6.3%)	95.6% (6.5%)	91.8% (17.1%)	94.8% (10.6%)	93.3% (14.3%)
Orange	94.3% (7.2%)	96.2% (5.5%)	95.2% (6.4%)	91.6% (11.6%)	93.4% (10.7%)	92.5% (11.2%)
Pastèque	95.4% (7.8%)	97.3% (5.1%)	96.3% (6.6%)	94.2% (8.8%)	96.3% (6.9%)	95.2% (7.9%)
Raisin	94.6% (7.6%)	94.4% (9.9%)	94.5% (8.8%)	94.0% (11.6%)	93.6% (17.1%)	93.8% (14.6%)

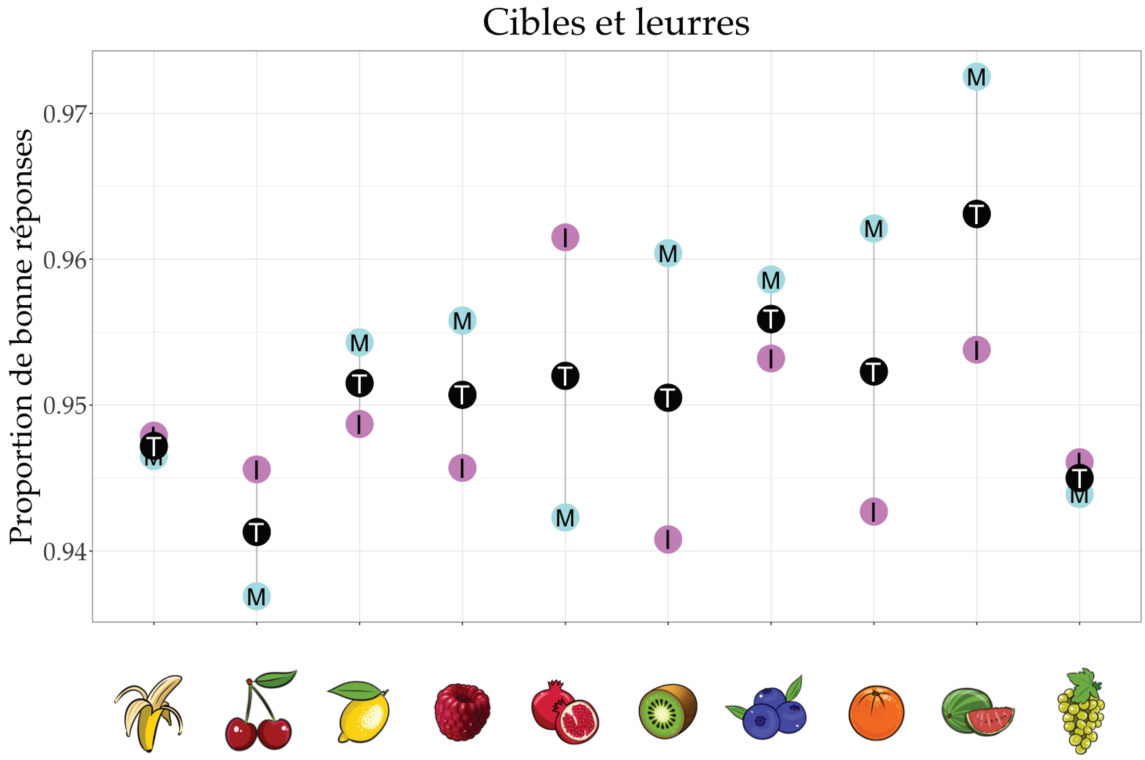


Figure C.1 – Proportions de bonnes réponses par item (cibles et leurres) dans l'Expérience 5. *Note.* Les points noirs représentent les proportions de bonnes réponses totales, les points violets représentent les proportions en condition Image et les points bleus représentent les proportions en condition Mot.

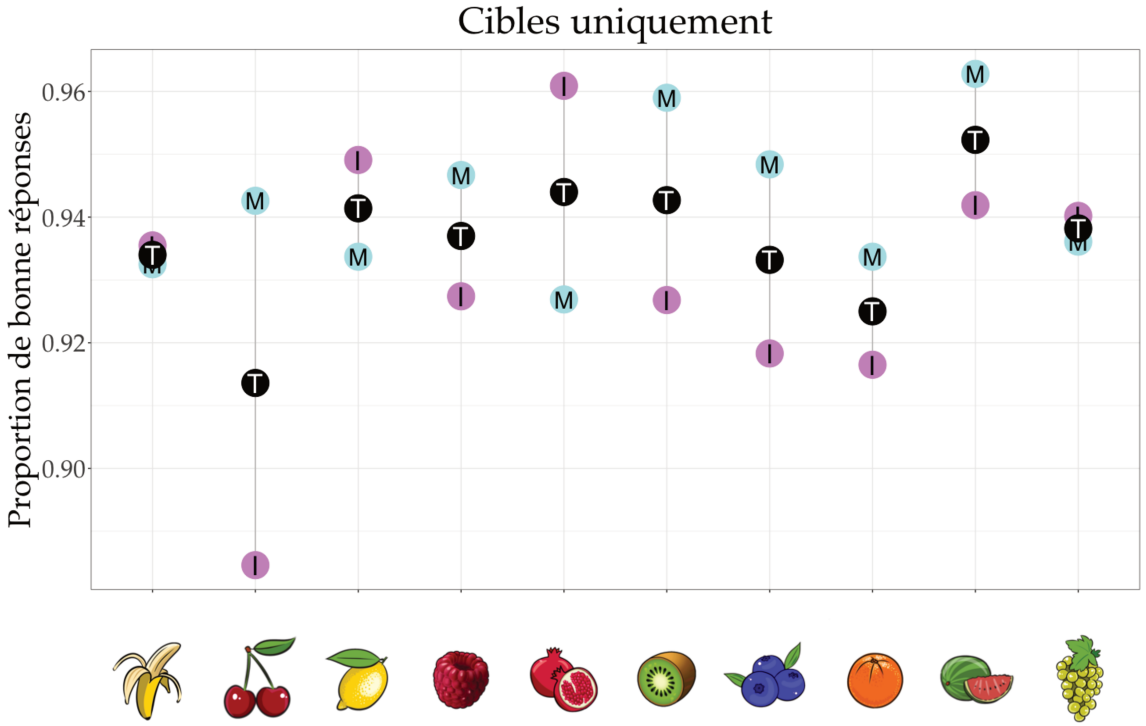


FIGURE C.2 – Proportions de bonnes réponses par item (cibles uniquement) dans l'Expérience 5. *Note.* Les points noirs représentent les proportions de bonnes réponses totales, les points violets représentent les proportions en condition Image et les points bleus représentent les proportions en condition Mot.

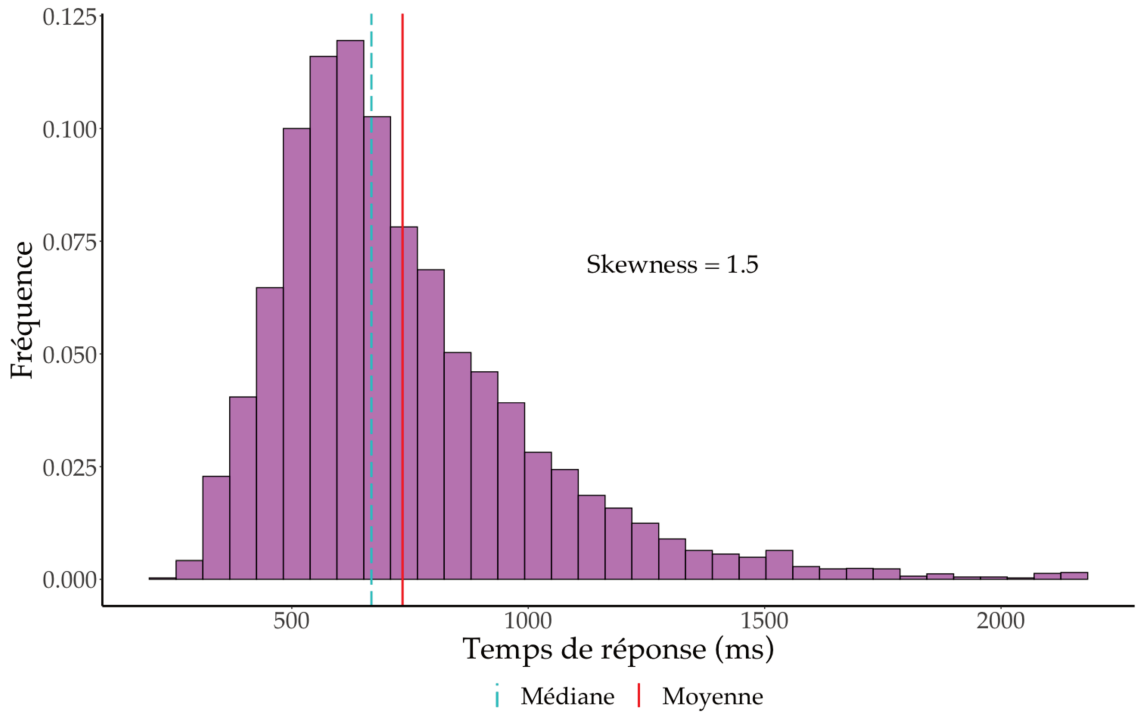


Figure C.3 – Histogramme des temps de réponse de l'Expérience 5 après winsorisation

Retour au texte

Tableau C.6 – Résultats de l'ANOVA effectuée sur les temps de réponse log-transformés de l'Expérience 5

Effet	*ddl*	F	η^2_p	p-valeur
Main	1, 127	1.03	.008	.312
Position	3, 381	2.41	.019	.067
Type de stimulus	1, 127	3.11	.024	.080
Quantité de sondes	1, 127	45.73	.265	$< .001$
Position × Main	3, 381	7.23	.054	$< .001$
Type de stimulus × Main	1, 127	1.74	.014	.189
Type de stimulus × Position	3, 381	1.52	.012	.208
Quantité de sondes × Main	1, 127	0.14	.001	.704
Quantité de sondes × Position	3, 381	9.52	.070	$< .001$
Quantité de sondes × Type de stimulus	1, 127	0.65	.005	.422
Type de stimulus × Position × Main	3, 381	0.15	.001	.933
Quantité de sondes × Position × Main	3, 381	1.25	.010	.293
Quantité de sondes × Type de stimulus × Position	3, 381	1.25	.010	.290
Quantité de sondes × Type de stimulus × Main	1, 127	0.52	.004	.471
Quantité de sondes × Type de stimulus × Position × Main	3, 381	0.47	.004	.703

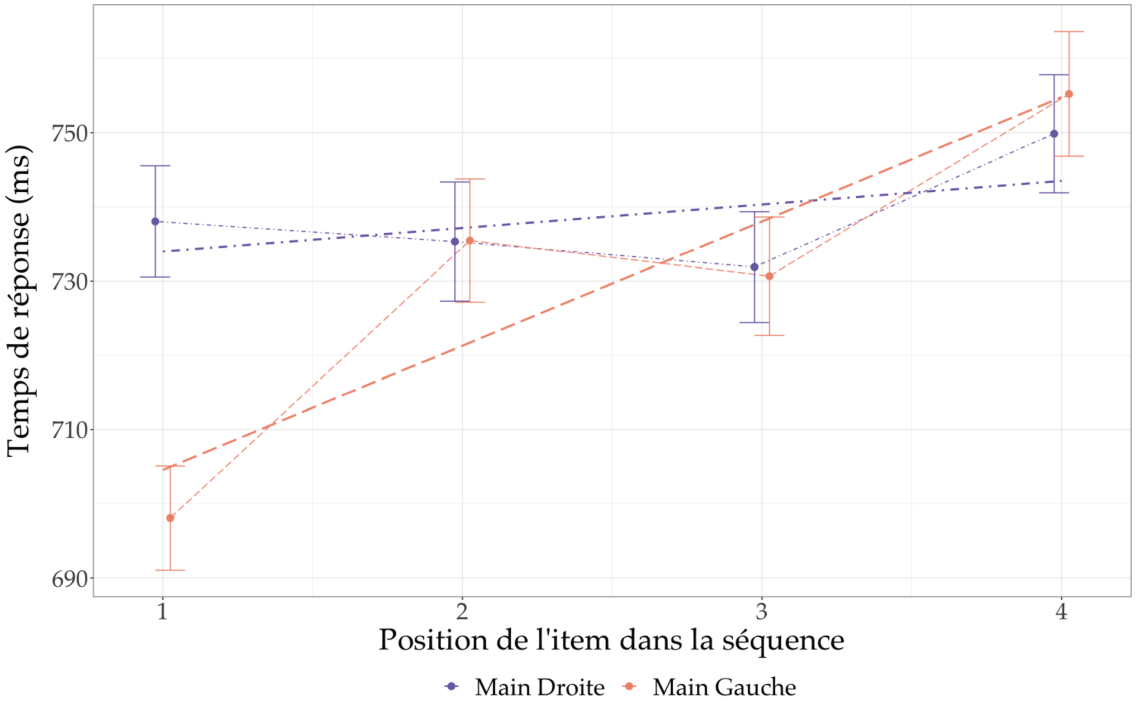


FIGURE C.4 – Moyenne et régression linéaire des temps réponse (exprimés en millisecondes) en fonction de la position de l'item dans la séquence et de la main de réponse pour l'Expérience 5. *Note.* Les barres d'erreur correspondent à ± 1 Erreur Standard.

TABLEAU C.7 – Temps de réponse moyens (et écart type) en fonction de la position de l'item, de la main de réponse et de la quantité de sondes (Mono-cible *vs.* Multi-cibles) pour l'Expérience 5

	Mono-cible		Multi-cibles	
Position	Main droite	Main gauche	Main droite	Main gauche
1	916 ms (279)	850 ms (264)	698 ms (244)	664 ms (234)
2	880 ms (274)	909 ms (317)	711 ms (273)	706 ms (272)
3	850 ms (270)	863 ms (281)	704 ms (258)	699 ms (275)
4	849 ms (287)	862 ms (309)	726 ms (273)	731 ms (288)

Tableau C.8 – Résultats du modèle $M14_{S1}$ de l'Expérience 5

Effet	Estimation	ES	t	p	$\beta Std.$
Intercept	1066.04	22.68	47.01	$< .001$	-
Position	-25.57	4.99	-5.12	$< .001$	-29.93
Main	-65.81	18.30	-3.60	$< .001$	-13.34
Quantité de sondes	-201.28	21.84	-9.22	$< .001$	-85.34
Type de stimulus	-59.50	20.60	-2.89	.004	-59.50
Essai	-0.34	0.23	-1.51	.132	-5.67
Position × Main	21.55	6.44	3.35	$< .001$	25.22
Position × Quantité de sondes	47.60	8.02	5.94	$< .001$	55.73
Main × Quantité de sondes	2.11	26.79	0.08	.937	-4.31
Position × Main × Quantité de sondes	-2.63	10.69	-0.25	.805	-3.08

Note. ES = Erreur Standard, Position = Position de l'item dans la séquence, Main = Main de réponse, Essai = Numéro de l'Essai.

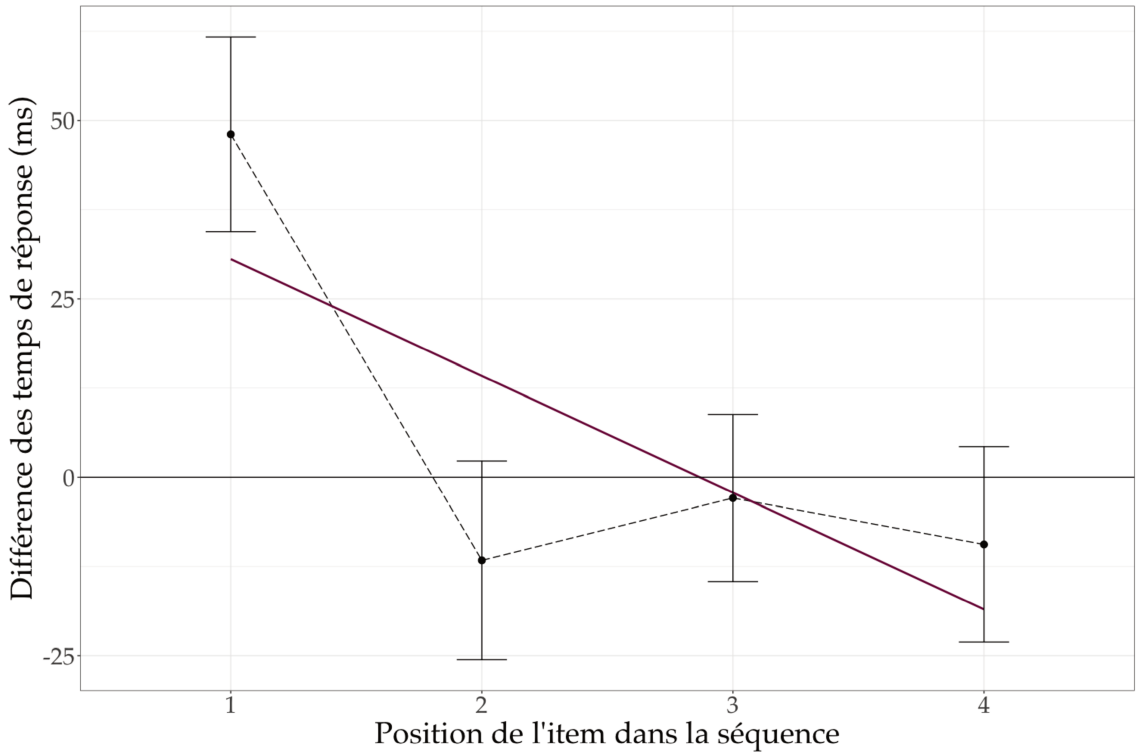


Figure C.5 – Régression linéaire de la différence des temps de réponse moyens (d_{TR}) entre main droite et main gauche en fonction de la position de l'item dans la séquence mémorisée pour l'ensemble des participants de l'Expérience 5. *Note.* Les d_{TR} ont été obtenus en soustrayant les temps de réponse de la main gauche aux temps de réponse de la main droite pour chaque position ($d_{TR} = TR_{\text{main droite}} - TR_{\text{main gauche}}$). La figure a été réalisée sur les données agrégées par position et par sujet.

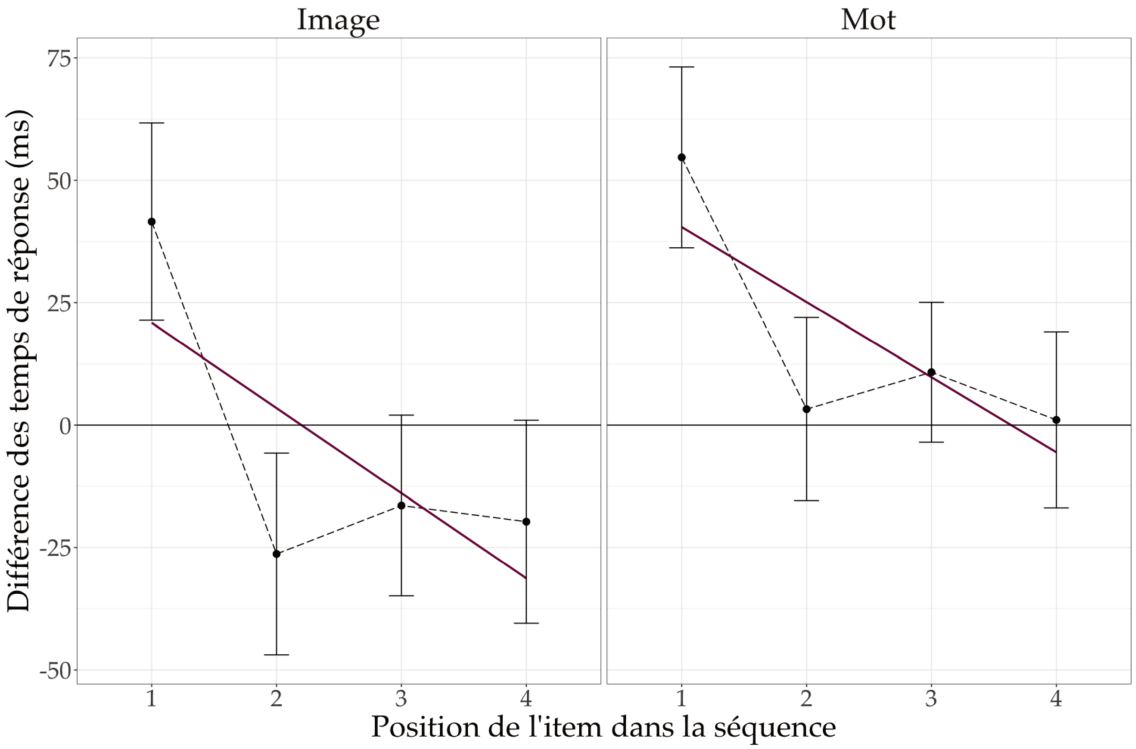


Figure C.6 – Régression linéaire de la différence des temps de réponse moyens (d_{TR}) entre main droite et main gauche en fonction de la position de l'item dans la séquence mémorisée et du type de stimulus pour l'Expérience 5 *Note*. La d_{TR} a été obtenue en soustrayant les temps de réponse de la main gauche aux temps de réponse de la main droite pour chaque position ($d_{TR} = TR_{\text{main droite}} - TR_{\text{main gauche}}$). La figure a été réalisée sur les données agrégées par position et par sujet, et les barres d'erreur correspondent à $\pm$ 1 Erreur Standard.

Tableau C.9 – Différences des temps réponse moyennes (et écart-type) en fonction de la position de l'item dans la séquence mémorisée et de la main utilisée pour répondre pour les conditions Mono-cible et Multi-cibles, puis pour les conditions Image et Mot de l'Expérience 5

	Quantité de sondes		Type de stimulus	
Position	Mono-cible	Multi-cibles	Image	Mot
1	64.28 ms (196)	33.04 ms (107)	41.55 ms (164)	54.68 ms (149)
2	-30.67 ms (205)	5.98 ms (99)	-26.32 ms (167)	3.26 ms (151)
3	-12.34 ms (160)	5.81 ms (104)	-16.43 ms (150)	10.80 ms (115)
4	-13.39 ms (205)	-5.73 ms (94)	-19.73 ms (168)	1.06 ms (145)

Tableau C.10 – Résultats de l'analyse log-linéaire effectuée sur la distribution des types de spatialisation (Pente Négative, Pas d'effet ou Pente Positive) en fonction de la Quantité de sondes et du Type de Stimulus dans l'Expérience 5

	ddl	L	p
Type de Spatialisation	2	75.05	$< .001$
Quantité de sondes	1	0.45	.502
Type de stimulus	1	0.03	.869
Type de spatialisation × Quantité de sondes	2	0.99	.609
Type de spatialisation × Type de stimulus	2	0.21	.903
Quantité de sondes × Type de stimulus	1	0.21	.643
Type de spatialisation × Quantité de sondes × Type de stimulus	1	0.77	.381

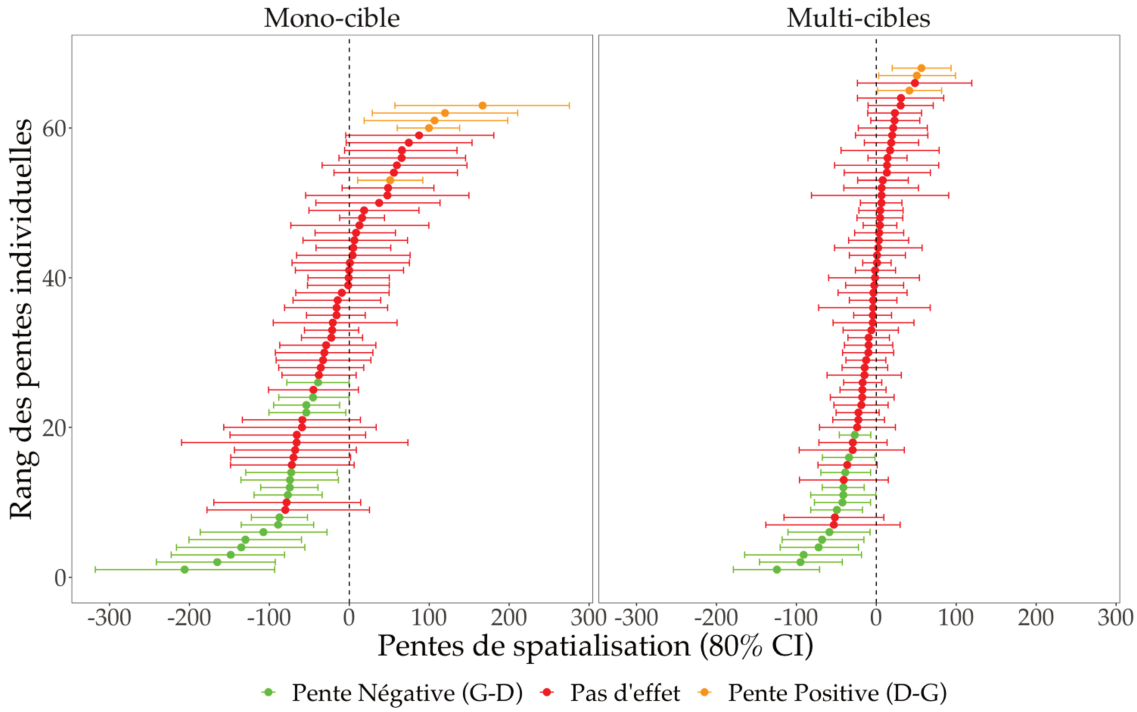


Figure C.7 – Comparaison des pentes empiriques et leur intervalle de confiance à 80% (calculées par bootstrap sur la base de 5000 rééchantillonnages) entre les conditions Mono-cible et Multi-cibles de l'Expérience 5 *Note.* Dans les conditions Mono-cible et Multi-cibles, les pourcentages de spatialiseurs gauche-droite sont respectivement 25% et 19%, les pourcentages de non-spatialiseurs sont respectivement 67% et 77% et les pourcentages de spatialiseurs droite-gauche sont respectivement 8% et 4%.

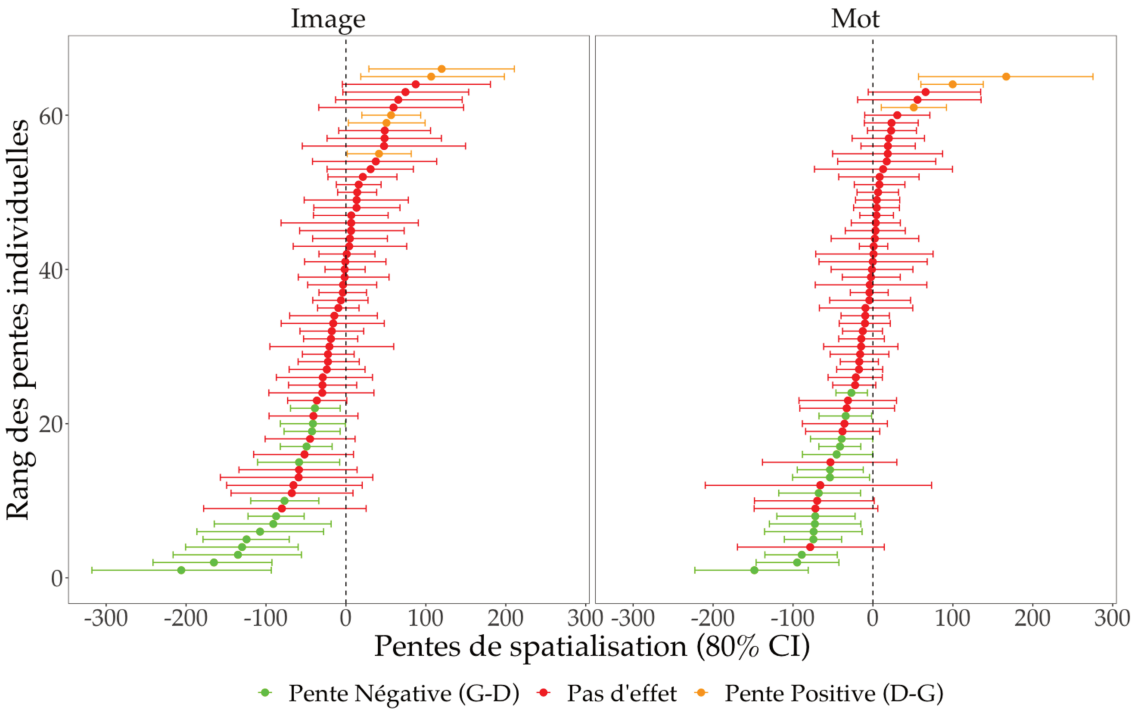


FIGURE C.8 – Comparaison des pentes empiriques et leur intervalle de confiance à 80% (calculées par bootstrap sur la base de 5000 rééchantillonnages) entre les conditions Image et Mot de l'Expérience 5. *Note.* Dans les conditions Image et Mot, les pourcentages de spatialiseurs gauche-droite sont respectivement 21% et 23%, les pourcentages de non-spatialiseurs sont respectivement 71% et 72% et les pourcentages de spatialiseurs droite-gauche sont respectivement 8% et 5%.

C.2 Expérience 6

Encadré C.1

Critères de correction du score de graphisme mesuré dans la BHK (Charles et al., 2004)

Les deux premiers critères sont évalués sur l'ensemble de la production. Les onze critères suivants sont cotés sur les cinq premières lignes, à raison d'un point par ligne lorsque le critère est rencontré. Un score élevé indique une fréquence accrue du trait graphique évalué.

Écriture grande Permet d'estimer la grandeur de l'écriture en mesurant la hauteur moyenne des lettres troncs (e.g., *a*, *e*, *i*, *m*, *n*, *o*) sur l'ensemble de la production. Un score de 0 à 5 est attribué en fonction de la hauteur mesurée. Une cotation différente est prodiguée en fonction du niveau scolaire : une écriture de 4 mm en moyenne rapporte 0 points en CP et CE1, contre 1 point à partir du CE2.

Inclinaison de la marge vers la droite Évalue si le texte est aligné sur le bord gauche de la feuille, ou s'il tend à s'incliner vers le bord droit. Un score allant de 0 (pas d'inclinaison) à 5 (forte inclinaison) est attribué pour l'ensemble du document.

Lignes non planes Vise à repérer des mots ou lettres « dansant(e)s », c'est-à-dire des mots ou lettres qui ne suivent pas une ligne horizontale régulière.

Mots serrés Mesure l'espacement entre deux mots, qui peut être considéré comme correct (si un « o » peut être placé entre les deux mots, 0 points) ou trop petit (1 point).

Écriture chaotique Évalue un tracé non fluide et crispé (liens trop longs, angles aigus, changements brusques de direction).

Liens interrompus entre les lettres Repère les levées de crayon inhabituelles (i.e., qui ne correspondent pas aux interruptions observées classiquement dans l'écriture cursive).

Télescopages Évalue la présence de superpositions ou chevauchements de lettres et de mots.

Variation de la grandeur des lettres troncs Repère une inconsistance anormale dans la hauteur des différentes lettres troncs. Pour chaque ligne, une valeur seuil est déterminée en fonction de la hauteur de la plus petite lettre tronc. Si la plus grande lettre tronc de la ligne dépasse cette valeur seuil, le critère est atteint.

Hauteur relative incorrecte La hauteur relative des lettres est dite « incorrecte » si des lettres troncs sont de la même taille que les lettres non-troncs (e.g., *t*, *f*, *l*, *p*, etc.).

Distorsion des lettres Consiste à repérer les lettres dont la forme ne fait pas partie des formes standards de l'alphabet.

Formes de lettres ambiguës Consiste à repérer les lettres dont la forme peut être confondue avec une autre lettre de l'alphabet, ou plus généralement lorsque les ressemblances et différences entre les lettres ne sont pas respectées.

Lettres retouchées Consiste à repérer les lettres ou parties de lettres sur lesquelles l'enfant est revenu plusieurs fois afin de retoucher son tracé.

Hésitation et tremblements Évalue la présence de tremblements et d'une mauvaise qualité de la trace écrite, liée à un manque de rigidité ou un mouvement graphique trop lent.

Tableau C.11 – Pourcentage (et écart-type) de réponses correctes en fonction de la longueur de la séquence et du groupe d'âge dans l'Expérience 6, d'abord pour l'ensemble des sondes (cibles et leurres) puis pour les items cibles uniquement

		L3	L4
Cibles et leurres	CP	79% (12%)	75% (9%)
	CE2	87% (7%)	79% (8%)
	CM2	89% (7%)	84% (10%)
Cibles uniquement	CP	80% (11%)	76% (15%)
	CE2	86% (8%)	80% (9%)
	CM2	90% (8%)	87% (8%)

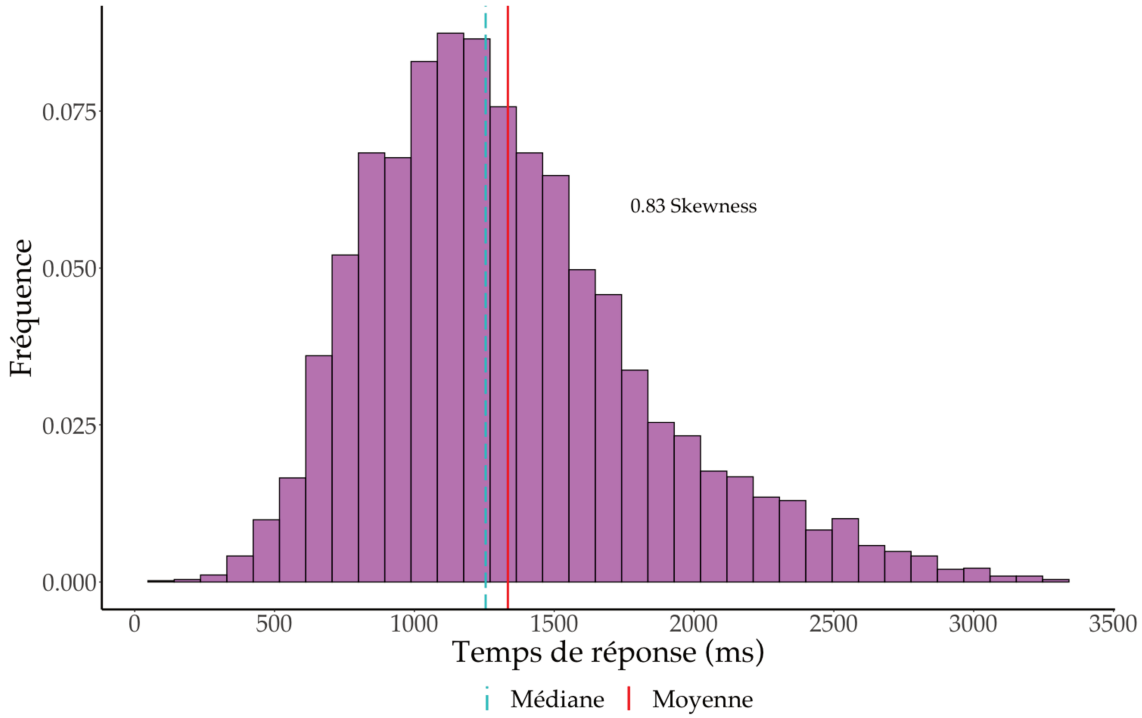


Figure C.9 – Histogramme des temps de réponse de l'Expérience 6 après winsorisation

Tableau C.12 – Modèles linéaires mixtes généralisés de l'Expérience 6

$M0$	⟵ TR ∼ (1|S)
$M1$	⟵ TR ∼ (1|I) + (1|S)
$M2$	⟵ TR ∼ Essai + (1|I) + (1|S)
$M3$	⟵ TR ∼ Essai + Session + (1|I) + (1|S)
$M4$	⟵ TR ∼ Position + Essai + Session + (1|I) + (1|S)
$M5$	⟵ TR ∼ Position + Main + Essai + Session + (1|I) + (1|S)
$M6$	⟵ TR ∼ Position + Main + Groupe + Essai + Session + (1|I) + (1|S)
$M7$	⟵ TR ∼ Position + Main + Groupe + Longueur + Essai + Session + (1|I) + (1|S)
$M8$	⟵ TR ∼ Position × Main + Groupe + Longueur + Essai + Session + (1|I) + (1|S)
$M9$	⟵ TR ∼ Position × Groupe + Main + Longueur + Essai + Session + (1|I) + (1|S)
$M10$	⟵ TR ∼ Position × Longueur + Main + Groupe + Essai + Session + (1|I) + (1|S)
$M11$	⟵ TR ∼ Main × Groupe + Longueur + Position + Essai + Session + (1|I) + (1|S)
$M12$	⟵ TR ∼ Main × Longueur + Groupe + Position + Essai + Session + (1|I) + (1|S)
$M13$	⟵ TR ∼ Groupe × Longueur + Main + Position + Essai + Session + (1|I) + (1|S)
$M14$	⟵ TR ∼ Position × Main × Groupe + Longueur + Essai + Session + (1|I) + (1|S)
$M15$	⟵ TR ∼ Position × Main × Longueur + Groupe + Essai + Session + (1|I) + (1|S)
$M16$	⟵ TR ∼ Position × Longueur × Groupe + Main + Essai + Session + (1|I) + (1|S)
$M17$	⟵ TR ∼ Main × Groupe × Longueur + Position + Essai + Session + (1|I) + (1|S)
$M18$	⟵ TR ∼ Position × Main × Groupe × Longueur + Essai + Session + (1|I) + (1|S)

Note. TR = Temps de Réponse, Position = Position de l'item dans la séquence, Main = Main de réponse, Groupe = groupe d'âge, Essai = Numéro de l'Essai, Session = Numéro de Session expérimentale, I = Item et S = Sujet. Les lignes colorées correspondent aux deux modèles les mieux classés par l'AIC, la ligne foncée correspondant au modèle avec l'AIC le plus faible des deux. La différence entre ces deux modèles n'est pas significative.

Tableau C.13 – Classement des modèles linéaires mixtes généralisés implémentés pour l'Expérience 6 selon leur nombre de paramètres (K), leur AICc, leur delta AICc et leur poids (AICcWt)

Modèles	K	$AICc$	$\Delta AICc$	$AICcWt$
$M14$	14	82160.6	0.00	0.96
$M18$	21	82168.2	7.64	0.02
$M8$	11	82170.1	9.54	0.01
$M9$	11	82171.6	11.02	0.00
$M15$	14	82172.3	11.74	0.00
$M17$	14	82173.5	12.89	0.00
$M12$	11	82175.6	15.07	0.00
$M16$	14	82175.8	15.17	0.00
$M13$	11	82176.2	15.62	0.00
$M11$	11	82177.5	16.92	0.00
$M7$	10	82178.7	18.10	0.00
$M10$	11	82180.6	20.07	0.00
$M6$	9	82213.6	52.98	0.00
$M4$	7	82223.7	63.08	0.00
$M5$	8	82225.2	64.66	0.00
$M3$	6	82244.7	84.14	0.00
$M2$	5	82247.8	87.27	0.00
$M1$	4	82249.5	88.88	0.00
$M0$	3	82275.8	115.26	0.00

Note. La différence de couleur indique la première différence significative détectée entre deux modèles. Pour une description de chaque modèle, voir le Tableau C.12.

Tableau C.14 – Résultats du modèle $M18$ de l'Expérience 6

Effet	Estimation	ES	t	p	$\beta Std.$
Intercept	1813.32	3.96	458.04	$< .001$	-
Position	-74.50	3.94	-18.91	$< .001$	-61.71
Main	22.33	4.38	5.09	$< .001$	-16.74
Groupe d'âge	-154.21	4.66	-33.12	$< .001$	-111.78
Longueur	-72.28	4.48	-16.13	$< .001$	46.40
Essai	1.06	0.55	1.92	.054	9.72
Session	-8.73	3.10	-2.82	.005	-9.77
Position × Main	-5.43	4.22	-1.29	.199	44.63
Position × Groupe d'âge	6.65	2.50	2.66	.008	5.46
Main × Groupe d'âge	-66.62	4.43	-15.05	$< .001$	-10.20
Position × Longueur	22.36	4.04	5.54	$< .001$	14.72
Main × Longueur	173.54	4.60	37.74	$< .001$	34.59
Groupe d'âge × Longueur	40.78	4.39	9.29	$< .001$	25.84
Position × Main × Groupe d'âge	23.48	2.65	8.87	$< .001$	19.24
Position × Main × Longueur	-36.67	3.58	-10.23	$< .001$	-30.39
Position × Groupe d'âge × Longueur	-3.78	2.79	-1.35	.176	-3.11
Main × Groupe d'âge × Longueur	-33.61	4.04	-8.33	$< .001$	-21.01
Position × Main × Groupe d'âge × Longueur	3.27	2.65	1.23	.218	2.70

Note. ES = Erreur Standard, Position = Position de l'item dans la séquence, Main = Main de réponse, Essai = Numéro de l'Essai et Session = Numéro de Session expérimentale.

Tableau C.15 – Temps de réponse moyens (et écart type) en fonction de la position de l'item et de la main de réponse, pour chaque groupe d'âge et chaque longueur, ainsi que pour l'ensemble des groupes d'âges dans l'Expérience 6

Position	CP		CE2		CM2		Tout âge confondu	
	Main droite	Main gauche	Main droite	Main gauche	Main droite	Main gauche	Main droite	Main gauche
				Longueur 3				
1	1522 ms (532)	1585 ms (517)	1421 ms (485)	1305 ms (470)	1220 ms (449)	1118 ms (415)	1370 ms (500)	1316 ms (500)
2	1519 ms (499)	1527 ms (515)	1373 ms (468)	1335 ms (457)	1238 ms (459)	1139 ms (413)	1362 ms (486)	1313 ms (482)
3	1419 ms (502)	1398 ms (434)	1263 ms (464)	1305 ms (457)	1133 ms (449)	1140 ms (382)	1259 ms (483)	1273 ms (437)
				Longueur 4				
1	1570 ms (594)	1559 ms (522)	1405 ms (521)	1443 ms (540)	1286 ms (498)	1203 ms (454)	1403 ms (544)	1388 ms (524)
2	1560 ms (570)	1631 ms (479)	1367 ms (503)	1371 ms (540)	1268 ms (438)	1303 ms (506)	1379 ms (510)	1410 ms (527)
3	1506 ms (517)	1563 ms (530)	1414 ms (567)	1343 ms (433)	1309 ms (542)	1272 ms (468)	1399 ms (548)	1382 ms (490)
4	1351 ms (525)	1410 ms (478)	1309 ms (477)	1273 ms (420)	1065 ms (413)	1210 ms (471)	1228 ms (484)	1290 ms (463)

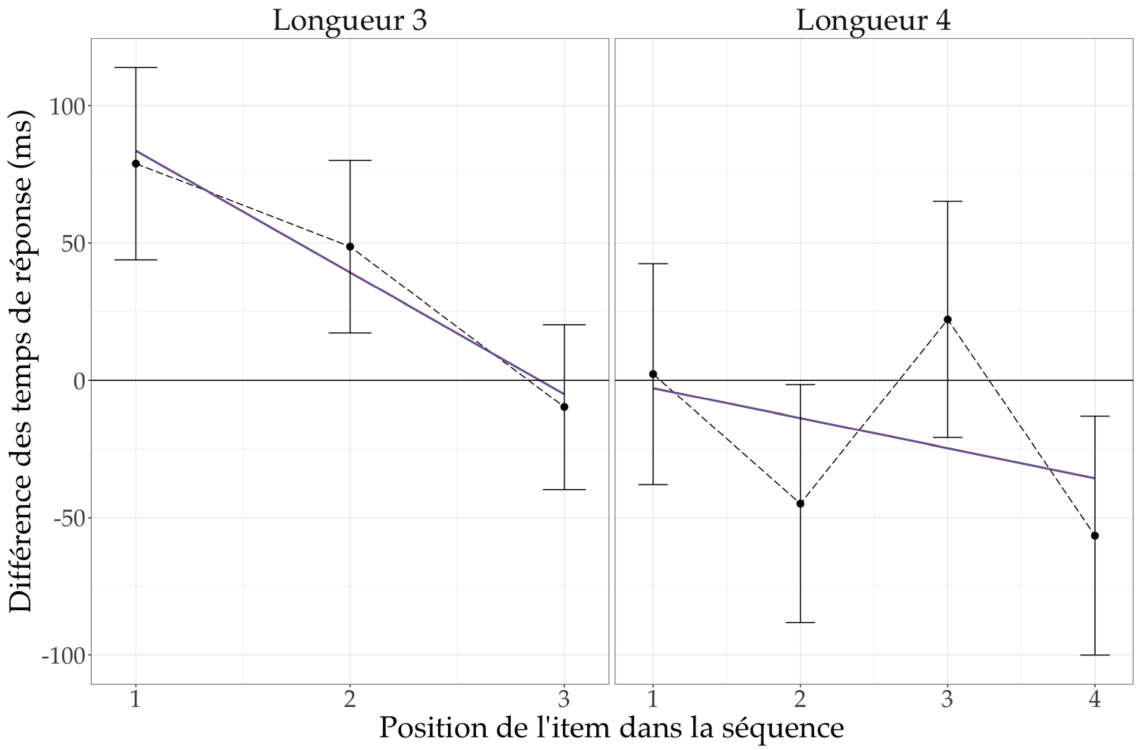


Figure C.10 – Régression linéaire de la différence des temps de réponse moyens (d_{TR}) entre main droite et main gauche en fonction de la position de l'item dans la séquence mémorisée et de la longueur de la séquence dans l'Expérience 6. *Note.* La figure a été réalisée sur les données agrégées par position et par sujet, et les barres d'erreur correspondent à ± 1 Erreur Standard.

Tableau C.16 – Différence des temps de réponse (d_{TR}) moyenne (et écart type) en fonction de la position de l'item pour chaque groupe d'âge et chaque longueur de séquence dans l'Expérience 6

Position	CP	CE2	CM2
		Longueur 3	
1	-8.45 ms (400)	130.98 ms (372)	101.36 ms (295)
2	11.43 ms (297)	33.12 ms (363)	95.00 ms (296)
3	0.56 ms (339)	-34.53 ms (347)	5.73 ms (232)
		Longueur 4	
1	-1.61 ms (480)	-14.68 ms (382)	22.11 ms (368)
2	-96.30 ms (561)	-16.16 ms (382)	-31.10 ms (387)
3	-31.74 ms (507)	68.00 ms (322)	21.28 ms (477)
4	-67.94 ms (511)	40.33 ms (356)	-141.56 ms (449)

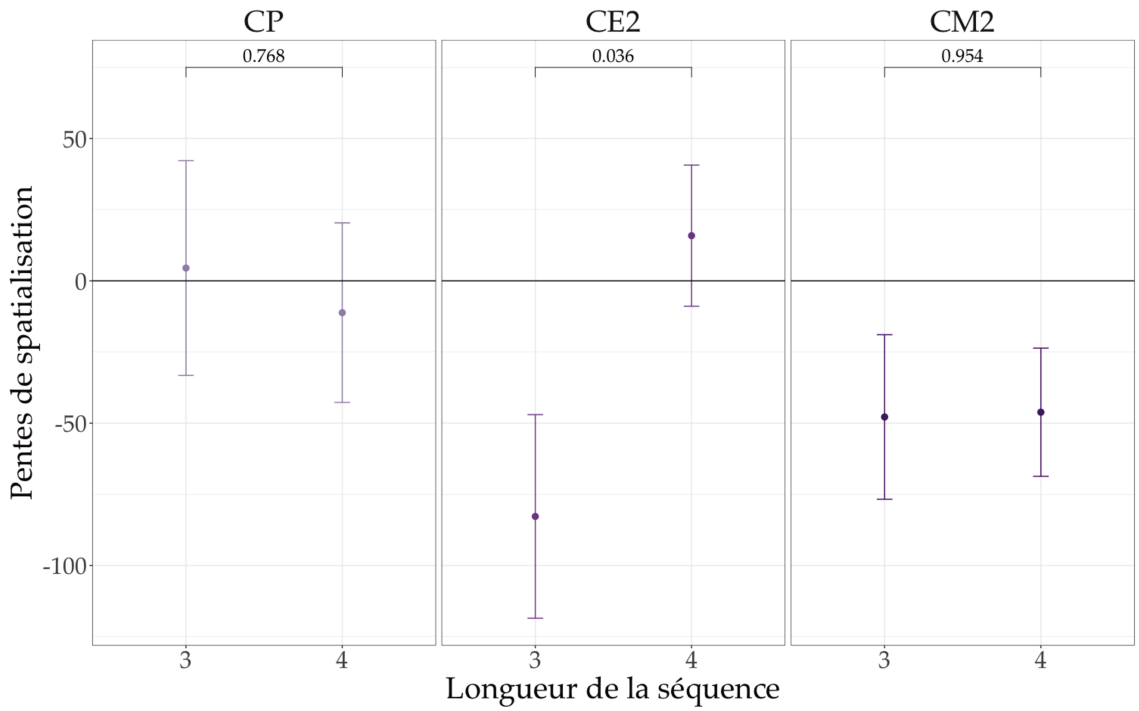


FIGURE C.11 – Pentes de spatialisation moyennes de l'Expérience 6, en fonction du groupe d'âge et du nombre d'items dans la séquence. *Note.* Les valeurs p indiquent le niveau de significativité obtenu au test t de Student sur échantillons appariés effectués entre les conditions L3 et L4.

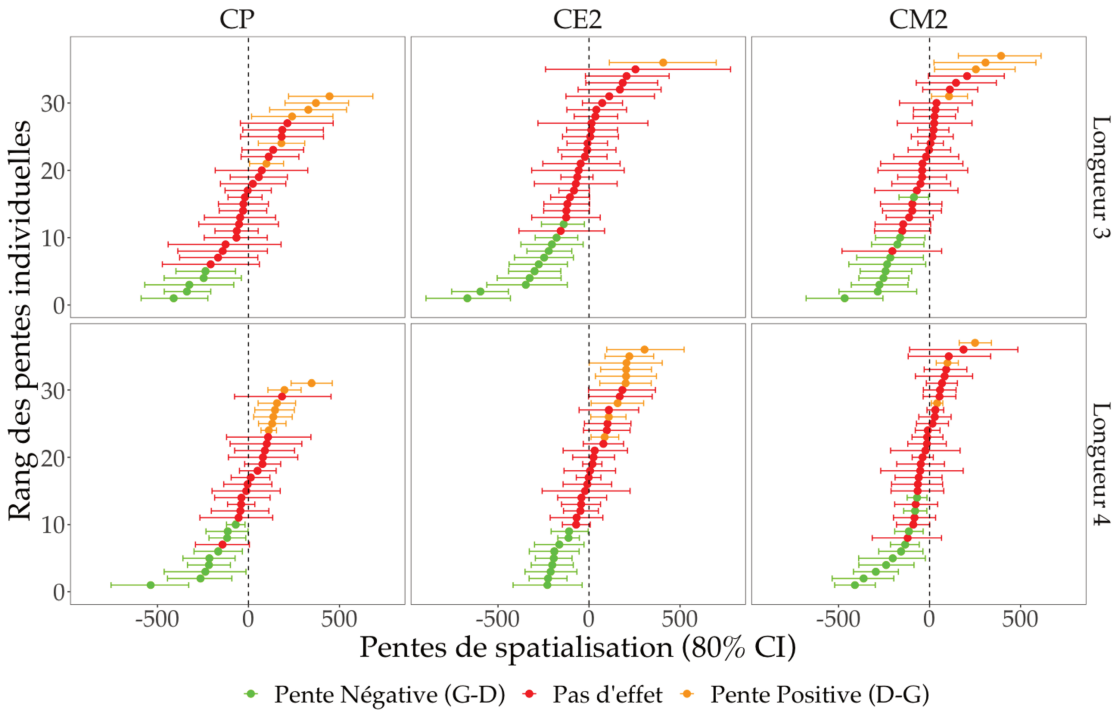


FIGURE C.12 – Pentes empiriques et leur intervalle de confiance à 80% (calculées par bootstrap sur la base de 5000 rééchantillonnages) pour chaque groupe d'âge et chaque longueur dans l'Expérience 6 *Note*. Chaque point représente la pente de régression d'un participant, et les segments représentent leur intervalle à 80%. Un participant présente un effet SPoARC orienté de gauche à droite si sa pente est négative et que son intervalle de confiance ne contient pas la valeur zéro (données identifiées en vert sur le graphique). Un participant présente un effet de spatialisation orienté de droite à gauche si sa pente est positive et que l'intervalle de confiance ne contient pas la valeur zéro (données identifiées en orange sur le graphique). Si l'intervalle de confiance contient la valeur zéro, aucun effet de spatialisation n'est identifié (données représentées en rouge sur le graphique).

Tableau C.17 – Tableau de contingence croisant les profils de spatialisation entre les conditions L3 et L4 pour chaque groupe d'âge dans l'Expérience 6

L3 → L4	Pente Négative		Absence d'effet		Pente Positive	
			CP			
Pente Négative	1	(20%)	2	(40%)	2	(40%)
Absence d'effet	6	(30%)	9	(45%)	5	(25%)
Pente Positive	2	(33%)	4	(67%)	0	(0%)
			CE2			
Pente Négative	2	(18%)	6	(55%)	3	(27%)
Absence d'effet	7	(29%)	12	(50%)	5	(21%)
Pente Positive	0	(0%)	0	(0%)	1	(100%)
			CM2			
Pente Négative	4	(40%)	5	(50%)	1	(10%)
Absence d'effet	6	(26%)	16	(70%)	1	(4%)
Pente Positive	0	(0%)	3	(75%)	1	(25%)

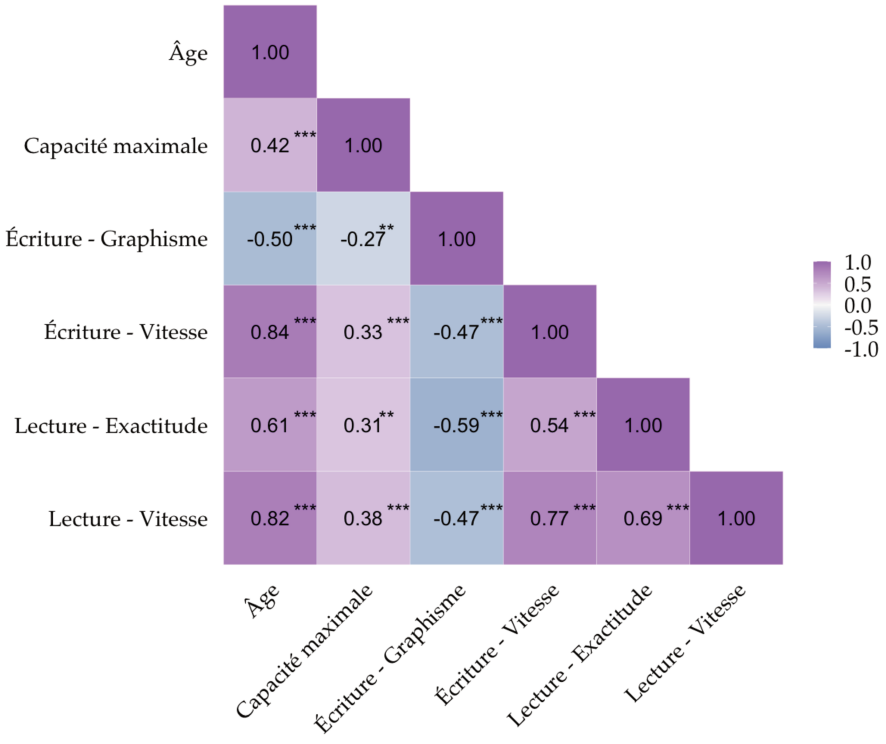


Figure C.13 – Corrélogramme entre l'âge, le niveau de lecture (vitesse et exactitude), d'écriture (vitesse et graphisme) et la capacité maximale des participants de l'Expérience 6 ($N = 98$)

Tableau C.18 – Résultats du modèle exécuté sur l'indice de spatialisation des participants de l'Expérience 6

Effet	Estimation	ES	t	p	$\beta Std.$
Intercept	-162.20	243.80	-0.67	.508	-
Âge	-15.40	20.15	-0.77	.447	-0.17
Capacité maximale	78.12	24.31	3.21	.002	0.35
Lecture - Exactitude	-0.63	2.30	-0.27	.785	-0.04
Lecture - Vitesse	0.11	0.29	0.40	.694	0.08
Écriture - Vitesse	-0.001	0.30	-0.001	.999	-0.001
Écriture - Graphisme	0.46	2.31	0.20	.842	0.03

Note. ES = Erreur Standard

C.3 Expérience 7

FIGURE C.14 – Diapositives des consignes et diapositive de fin utilisées dans la tâche de spatialisation de l'Expérience 7. *Note.* Ordre de lecture : de gauche à droite puis de bas en haut.

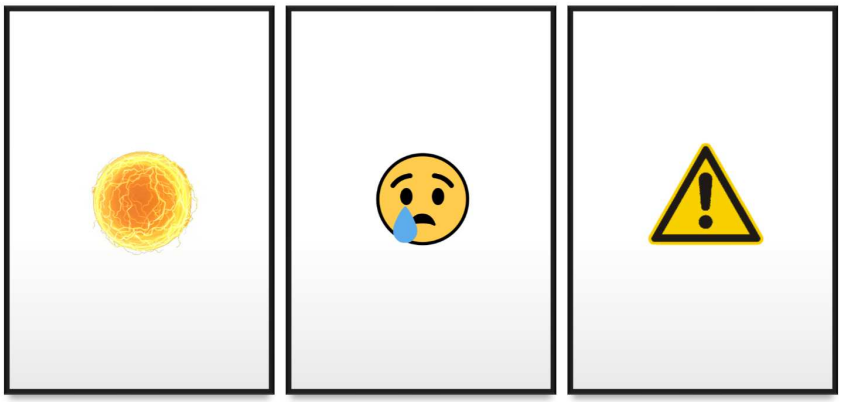


FIGURE C.15 – Feedbacks utilisés dans la tâche de spatialisation de l'Expérience 7. *Note.* De gauche à droite : feedback présenté en cas de réponse correcte, incorrecte ou lorsqu'aucune réponse n'était donnée dans le temps imparti.

Tableau C.19 – Pourcentage (et écart-type) de réponses correctes en fonction de la longueur de la séquence et du groupe d'âge dans l'Expérience 7, d'abord pour l'ensemble des sondes (cibles et leurres) puis pour les items cibles uniquement

		L2	L3
Cibles et leurres	CP	90% (6%)	87% (7%)
	CE2	93% (5%)	92% (5%)
Cibles uniquement	CP	90% (8%)	86% (10%)
	CE2	93% (7%)	93% (6%)

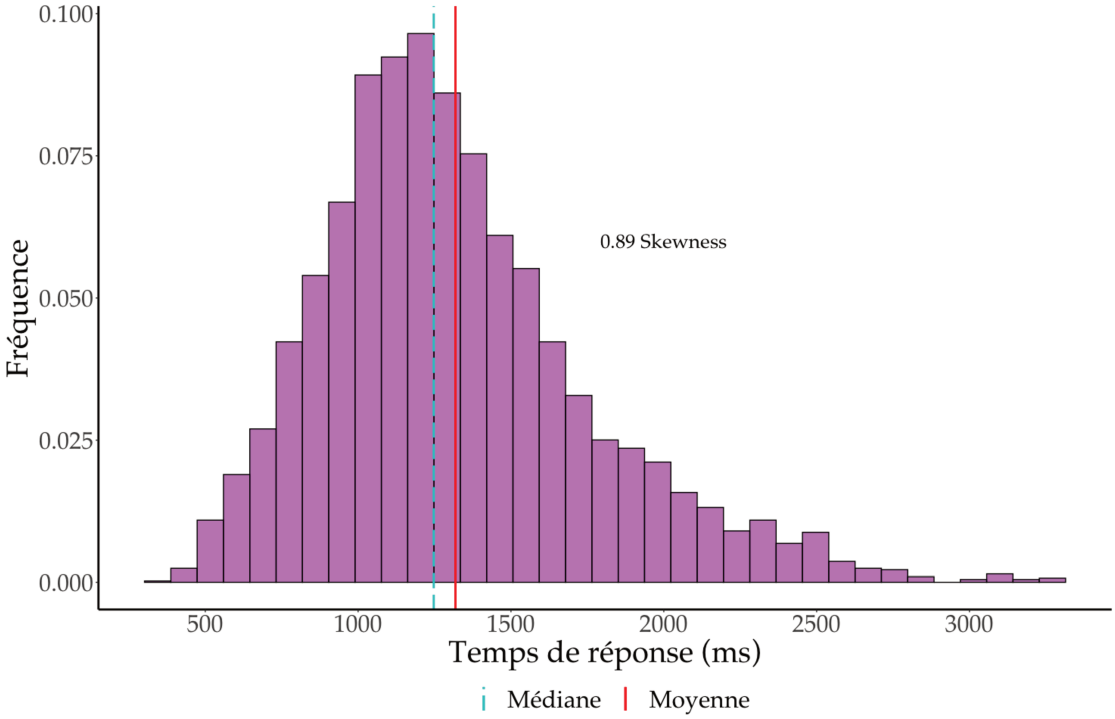


Figure C.16 – Histogramme des temps de réponse de l'Expérience 7 après winsorisation

Tableau C.20 – Modèles linéaires mixtes généralisés implémentés dans l'Expérience 7

$M0$	⟵ TR ∼ (1|S)
$M1$	⟵ TR ∼ (1|I) + (1|S)
$M2$	⟵ TR ∼ Essai + (1|I) + (1|S)
$M3$	⟵ TR ∼ Essai + Session + (1|I) + (1|S)
$M4$	⟵ TR ∼ Position + Essai + Session + (1|I) + (1|S)
$M5$	⟵ TR ∼ Position + Main + Essai + Session + (1|I) + (1|S)
$M6$	⟵ TR ∼ Position + Main + Groupe + Essai + Session + (1|I) + (1|S)
$M7$	⟵ TR ∼ Position + Main + Groupe + Longueur + Essai + Session + (1|I) + (1|S)
$M8$	⟵ TR ∼ Position × Main + Groupe + Longueur + Essai + Session + (1|I) + (1|S)
$M9$	⟵ TR ∼ Position × Groupe + Main + Longueur + Essai + Session + (1|I) + (1|S)
$M10$	⟵ TR ∼ Position × Longueur + Main + Groupe + Essai + Session + (1|I) + (1|S)
$M11$	⟵ TR ∼ Main × Groupe + Longueur + Position + Essai + Session + (1|I) + (1|S)
$M12$	⟵ TR ∼ Main × Longueur + Groupe + Position + Essai + Session + (1|I) + (1|S)
$M13$	⟵ TR ∼ Groupe × Longueur + Main + Position + Essai + Session + (1|I) + (1|S)
$M14$	⟵ TR ∼ Position × Main × Groupe + Longueur + Essai + Session + (1|I) + (1|S)
$M15$	⟵ TR ∼ Position × Main × Longueur + Groupe + Essai + Session + (1|I) + (1|S)
$M16$	⟵ TR ∼ Position × Longueur × Groupe + Main + Essai + Session + (1|I) + (1|S)
$M17$	⟵ TR ∼ Main × Groupe × Longueur + Position + Essai + Session + (1|I) + (1|S)
$M18$	⟵ TR ∼ Position × Main × Groupe × Longueur + Essai + Session + (1|I) + (1|S)

Note. TR = Temps de Réponse, Position = Position de l'item dans la séquence, Main = Main de réponse, Groupe = groupe d'âge, Essai = Numéro de l'Essai, Session = Numéro de Session expérimentale, I = Item et S = Sujet. La ligne colorée correspond au modèle classé premier par l'AIC.

Tableau C.21 – Classement des modèles linéaires mixtes généralisés implémentés pour l'Expérience 7 selon leur nombre de paramètres (K), leur AICc, leur delta AICc et leur poids (AICcWt)

Modèles	K	$AICc$	$\Delta AICc$	$AICcWt$
$M9$	11	59462.43	0.00	0.37
$M12$	11	59463.50	1.07	0.22
$M14$	14	59465.13	2.70	0.10
$M17$	14	59465.21	2.78	0.09
$M11$	11	59466.12	3.69	0.06
$M7$	10	59466.77	4.34	0.04
$M16$	14	59467.34	4.91	0.03
$M10$	11	59467.66	5.23	0.03
$M13$	11	59467.87	5.44	0.02
$M15$	14	59468.08	5.65	0.02
$M8$	11	59468.58	6.15	0.02
$M18$	21	59471.25	8.82	0.00
$M6$	9	59532.18	69.75	0.00
$M5$	8	59539.09	76.66	0.00
$M2$	5	59546.76	84.33	0.00
$M3$	6	59548.14	85.71	0.00
$M4$	7	59548.46	86.03	0.00
$M1$	4	59561.02	98.59	0.00
$M0$	3	59575.06	112.63	0.00

Note. Pour une description de chaque modèle, voir le Tableau C.20.

Tableau C.22 – Tableau de contingence croisant les profils de spatialisation entre les conditions L2 et L3 pour chaque groupe d'âge dans l'Expérience 7

L2 → L3	Pente Négative		Absence d'effet		Pente Positive	
			CP			
Pente Négative	0	(0%)	4	(80%)	1	(20%)
Absence d'effet	6	(26%)	13	(57%)	4	(17%)
Pente Positive	1	(13%)	5	(62%)	2	(25%)
			CE2			
Pente Négative	0	(0%)	6	(100%)	0	(0%)
Absence d'effet	1	(5%)	17	(81%)	3	(14%)
Pente Positive	1	(13%)	7	(87%)	0	(0%)

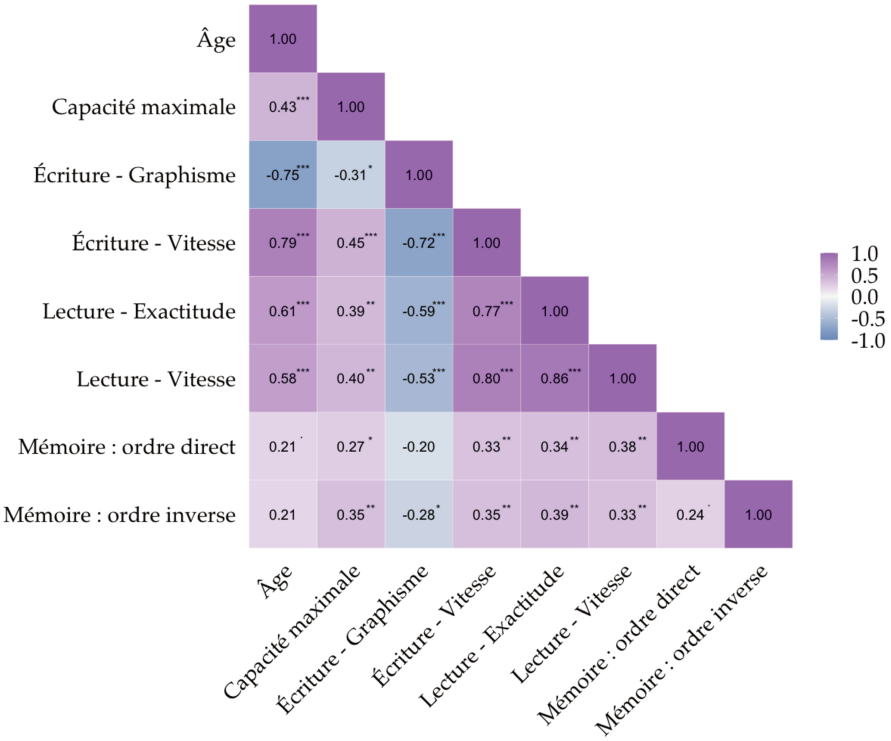


Figure C.17 – Corrélogramme entre l'âge chronologique, le niveau de lecture (vitesse et exactitude), d'écriture (vitesse et graphisme) et la capacité en mémoire (capacité maximale, score en ordre direct et score en ordre inverse) des participants de l'Expérience 7 ($N = 62$). *Note.* L'effectif correspond à l'ensemble des participants (à l'exception des spatialiseurs inverses) pour lesquels les scores de vitesse et d'exactitude en lecture ont pu être calculés. Six participants ont donc été écartés de cette analyse.

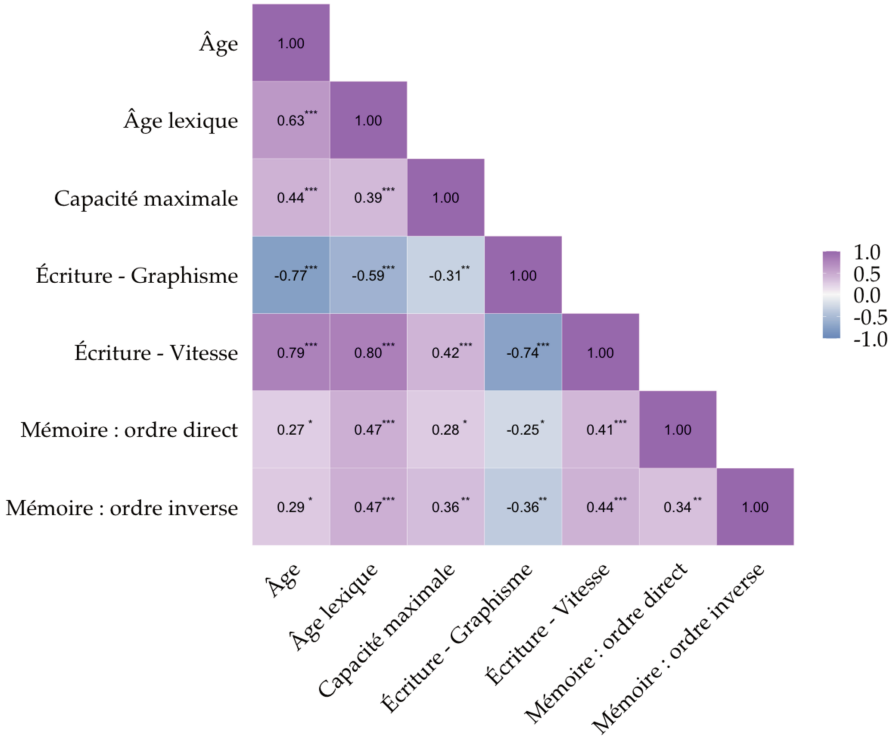


Figure C.18 – Corrélogramme entre l'âge chronologique, l'âge lexique, le niveau d'écriture (vitesse et graphisme) et la capacité en mémoire (capacité maximale, score en ordre direct et score en ordre inverse) des participants de l'Expérience 7 (N = 68). *Note.* À la différence du corrélogramme C.17, l'analyse inclut ici l'ensemble de l'échantillon (hors spatialiseurs inverses), l'âge lexique ayant pu être calculé pour la totalité des participants.

Tableau C.23 – Résultats des modèles exécutés sur l'indice de spatialisation des participants de l'Expérience 7

Effet	Estimation	ES	t	p	$\beta Std.$
		M1			
Intercept	-278.39	455.68	-0.61	.544	–
Âge	-7.00	48.25	-0.15	.885	-0.05
Capacité maximale	54.66	76.73	0.71	.479	0.11
Lecture - Exactitude	1.93	2.43	0.80	.430	0.20
Lecture - Vitesse	-0.24	0.47	-0.52	.608	-0.14
Écriture - Graphisme	-1.88	4.07	-0.46	.647	-0.11
Écriture - Vitesse	-0.39	0.79	-0.50	.618	-0.16
Mémoire - Ordre direct	11.25	16.59	0.68	.500	0.11
Mémoire - Ordre inverse	-4.02	14.77	-0.27	.787	-0.04
		M2			
Intercept	-217.86	423.23	-0.52	.609	–
Âge	5.17	45.82	0.11	.911	0.03
Capacité maximale	58.85	73.87	0.80	.429	0.12
Âge lexique	-20.41	26.82	-0.76	.450	-0.15
Écriture - Graphisme	-0.98	3.81	-0.26	.799	-0.06
Écriture - Vitesse	-0.18	0.74	-0.24	.810	-0.07
Mémoire - Ordre direct	16.76	15.59	1.08	.287	0.16
Mémoire - Ordre inverse	0.62	14.44	0.04	.966	0.01

Note. ES = Erreur Standard. Dans le modèle $M1$, le niveau de lecture/écriture correspond aux scores d'exactitude et de vitesse ($N = 62$). Le modèle $M2$ rend compte du niveau de lecture par le biais de l'âge lexique ($N = 68$).

Tableau C.24 – Moyennes (et écart-type) de l'âge chronologique, des mesures de lecture/écriture et de capacité mnésique entre les deux clusters identifiés par l'analyse *k-means* sur les données groupées de l'Expérience 6 et de l'Expérience 7

Variable	Forte spatialisation (C1)		Faible spatialisation (C2)	
	CP et CE2			
Âge lexique	7.49	(1.12)	7.51	(1.12)
Lecture - Exactitude	82.24	(15.03)	83.26	(14.21)
Lecture - Vitesse	124.72	(87.86)	134.58	(88.60)
Écriture - Graphisme	22.05	(9.67)	21.79	(9.20)
Écriture - Vitesse	100.26	(66.89)	103.44	(63.08)
Capacité maximale	2.20	(0.55)	2.50	(0.50)
Mémoire - ordre direct	6.09	(1.40)	6.85	(1.57)
Mémoire - ordre inverse	6.79	(1.90)	7.00	(1.75)
Âge chronologique	7.65	(1.09)	7.64	(1.04)
	CP, CE2 et CM2			
Âge lexique	8.01	(1.69)	8.01	(1.53)
Lecture - Exactitude	84.93	(14.39)	85.85	(13.48)
Lecture - Vitesse	160.25	(111.18)	169.50	(106.09)
Écriture - Graphisme	20.31	(9.71)	19.91	(9.33)
Écriture - Vitesse	131.15	(90.12)	139.11	(94.85)
Capacité maximale	2.23	(0.53)	2.63	(0.57)
Mémoire - ordre direct	6.30	(1.49)	7.04	(1.58)
Mémoire - ordre inverse	6.97	(1.82)	7.19	(2.01)
Âge chronologique	8.30	(1.62)	8.35	(1.64)

Tableau C.25 – Moyennes (et écart-type) de l'âge chronologique, du niveau de lecture/écriture et des performances mnésiques des élèves de CE2 dans l'Expérience 6 et dans l'Expérience 7

Variable	CE2 - Exp.6		CE2 - Exp.7	
Lecture - Exactitude	92.69	(5.10)	89.85	(5.59)
Lecture - Vitesse	193.97	(57.98)	177.30	(69.58)
Écriture - Graphisme	16.28	(7.54)	16.26	(4.97)
Écriture - Vitesse	155.67	(43.19)	151.74	(43.43)
Capacité en longueur 3	2.20	(0.42)	2.64	(0.26)
Mémoire - ordre direct	6.87	(1.69)	7.29	(1.38)
Mémoire - ordre inverse	7.78	(1.91)	7.46	(1.63)
Âge chronologique	8.75	(0.31)	8.44	(0.32)
Pente L3 (spatialisation)	-82.75	(214.60)	1.83	(120.09)

Annexe D

Matériel supplémentaire du Chapitre 4

D.1 Expérience 8

Tableau D.1 – Permutations de l'ordre dans lequel les séquences cibles et leurres ont été présentées aux participants pendant la tâche de rappel à long terme de l'Expérience 8. *Note.* Les première et deuxième séquences mémorisées par les participants lors de la tâche de spatialisation (séquences cibles) sont codées C1 et C2 respectivement. Les séquences leurres sont codées L.

Permutation	Première séquence	Deuxième séquence	Troisième séquence	Quatrième séquence
A	C1	C2	L	L
B	C1	L	C2	L
C	C1	L	L	C2
D	L	C1	C2	L
E	L	C1	L	C2
F	L	L	C1	C2
G	C2	C1	L	L
H	C2	L	C1	L
I	C2	L	L	C1
J	L	C2	C1	L
K	L	C2	L	C1
L	L	L	C2	C1

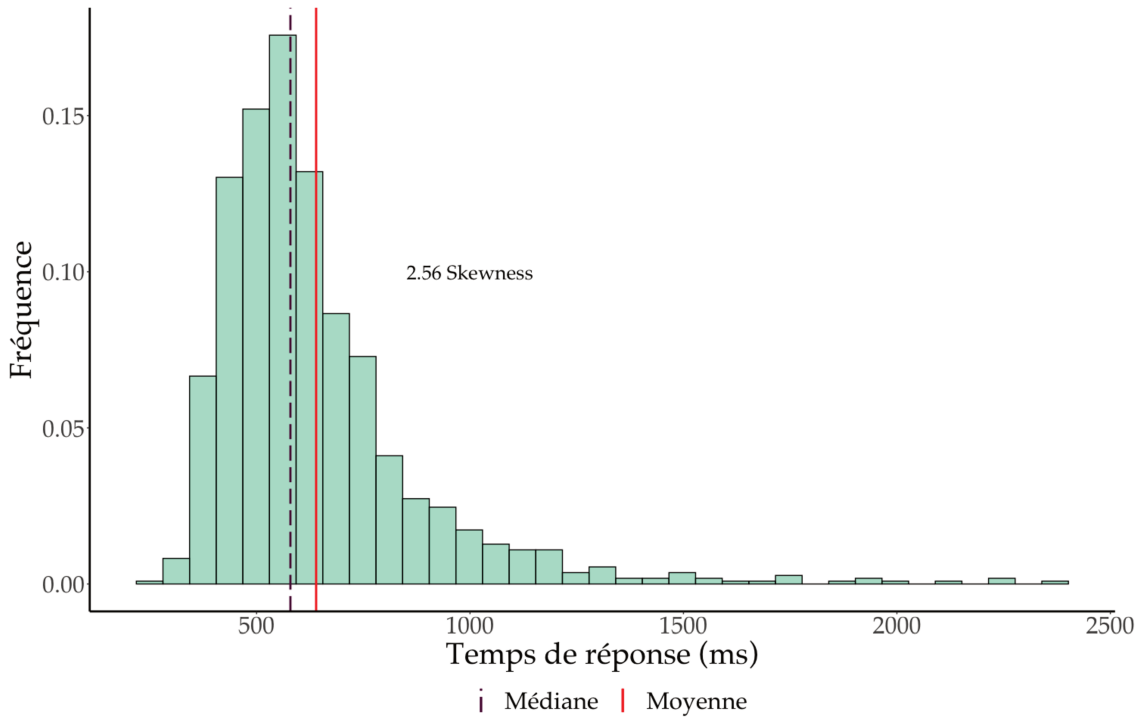


Figure D.1 – Histogramme des temps de réponse de l'Expérience 8 après winsorisation

Tableau D.2 – Modèles linéaires mixtes généralisés de l'Expérience 8

$M0$	$\longleftarrow$ TR $\sim$ (1|S)
$M1$	$\longleftarrow$ TR $\sim$ (1|I) + (1|S)
$M2$	$\longleftarrow$ TR $\sim$ Position + (1|I) + (1|S)
$M3$	$\longleftarrow$ TR $\sim$ Position + Main + (1|I) + (1|S)
$M4$	$\longleftarrow$ TR $\sim$ Position + Main + Bloc + (1|I) + (1|S)
$M5$	$\longleftarrow$ TR $\sim$ Position $\times$ Main + Bloc + (1|I) + (1|S)
$M6$	$\longleftarrow$ TR $\sim$ Position $\times$ Bloc + Main + (1|I) + (1|S)
$M7$	$\longleftarrow$ TR $\sim$ Bloc $\times$ Main + Position + (1|I) + (1|S)
$M8$	$\longleftarrow$ TR $\sim$ Position $\times$ Main $\times$ Bloc + (1|I) + (1|S)

Note. TR = Temps de Réponse, Position = Position de l'item dans la séquence, Main = Main de réponse, Bloc = Numéro de bloc ou Numéro de sous-bloc, I = Item et S = Sujet. Les lignes colorées correspondent aux deux modèles les mieux classés par l'AIC, la ligne foncée correspondant au modèle avec l'AIC le plus faible. La différence entre ces deux modèles n'est pas significative. Dans le texte, nous utilisons les indices M_R et M_{NR} pour distinguer respectivement les séquences répétées des séquences non-répétées. Les modèles implémentés pour l'analyse par sous-bloc sont indicés par M_{SB}.

Tableau D.3 – Classement des modèles linéaires mixtes généralisés implémentés sur les données répétées de l'Expérience 8 selon leur nombre de paramètres (K), leur AICc, leur delta AICc et leur poids (AICcWt)

Modèles	K	$AICc$	$\Delta AICc$	$AICcWt$
$M5_R$	8	13935.93	0	0.59
$M8_R$	11	13936.93	1.00	0.36
$M7_R$	8	13942.06	6.13	0.03
$M4_R$	7	13943.18	7.25	0.02
$M6_R$	8	13944.61	8.68	0.01
$M3_R$	6	13965.56	29.63	0.00
$M2_R$	5	13971.40	35.47	0.00
$M1_R$	4	13990.80	54.87	0.00
$M0_R$	3	13997.44	61.51	0.00

Note. La différence de couleur indique la première différence significative détectée entre deux modèles. Pour une description de chaque modèle, voir le Tableau D.2.

Tableau D.4 – Résultats du modèle $M8_R$ de l'Expérience 8

Effet	Estimation	ES	t	p	$\beta Std.$
Intercept	793.64	13.71	57.89	$< .001$	-
Position	-35.33	4.60	-7.69	$< .001$	-39.52
Main	-42.93	13.35	-3.22	.001	33.32
Bloc	-59.24	13.17	-4.50	$< .001$	-26.43
Position × Bloc	12.97	5.23	2.48	.013	14.53
Main × Bloc	14.60	15.03	0.97	.332	-25.53
Position × Main	30.11	5.45	5.52	$< .001$	33.67
Position × Main × Bloc	-15.87	6.76	-2.35	.019	-17.78

Note. ES = Erreur Standard, Position = Position de l'item dans la séquence, Main = Main de réponse et Bloc = Numéro de bloc.

Tableau D.5 – Temps de réponse moyens (et écart-type) en fonction de la position de l'item et de la main de réponse, sur l'ensemble de la tâche et pour chacun des deux blocs consécutifs de l'Expérience 8, d'abord pour les séquences répétées, puis pour les données non-répétées tirées de Vivion et al. (2025b, Exp.1)

Position	Pour l'ensemble des blocs		Bloc 1		Bloc 2	
	Main droite	Main gauche	Main droite	Main gauche	Main droite	Main gauche
			Séquences répétées			
1	664 ms (241)	672 ms (282)	687 ms (264)	692 ms (263)	640 ms (216)	653 ms (299)
2	645 ms (241)	640 ms (221)	664 ms (230)	690 ms (241)	626 ms (251)	589 ms (186)
3	640 ms (296)	660 ms (223)	665 ms (298)	686 ms (237)	616 ms (294)	634 ms (208)
4	580 ms (240)	621 ms (224)	562 ms (222)	653 ms (234)	597 ms (258)	589 ms (210)
			Séquences non-répétées			
1	974 ms (360)	968 ms (400)	967 ms (296)	1028 ms (453)	981 ms (420)	906 ms (328)
2	970 ms (387)	1010 ms (423)	980 ms (424)	1017 ms (396)	960 ms (349)	1004 ms (451)
3	929 ms (345)	965 ms (356)	971 ms (351)	1051 ms (398)	888 ms (336)	898 ms (306)
4	879 ms (385)	996 ms (414)	913 ms (408)	1018 ms (440)	833 ms (349)	974 ms (388)

Tableau D.6 – Temps de réponse moyens (et écart-type) en fonction de la position de l'item et de la main de réponse pour chacun des quatre sous-blocs consécutifs de l'Expérience 8

Position	Sous-bloc 1		Sous-bloc 2		Sous-bloc 3		Sous-bloc 4	
	Main droite	Main gauche	Main droite	Main gauche	Main droite	Main gauche	Main droite	Main gauche
1	697 ms (212)	735 ms (333)	675 ms (322)	660 ms (198)	648 ms (244)	617 ms (230)	632 ms (181)	708 ms (380)
2	711 ms (270)	746 ms (305)	627 ms (188)	639 ms (149)	650 ms (183)	596 ms (209)	609 ms (289)	582 ms (165)
3	675 ms (303)	666 ms (178)	654 ms (297)	704 ms (281)	612 ms (249)	653 ms (232)	619 ms (341)	606 ms (165)
4	598 ms (298)	714 ms (265)	532 ms (126)	578 ms (164)	584 ms (277)	569 ms (155)	616 ms (231)	608 ms (250)

Analyse D.1

Analyse comparative de données non-répétées (Expérience 8)

Description des données

Cette étude comparative regroupait 35 étudiants en première et deuxième année de Psychologie (âge moyen = 23 ans, $ET = 6.33$, 34 droitiers, 26 femmes). Le matériel et la procédure correspondaient à ceux de l'Expérience 8 : les participants devaient mémoriser des séries de quatre images de fruits affichées séquentiellement au centre de l'écran. Après cette phase de mémorisation, les participants devaient indiquer si une sonde appartenait ou non à la séquence mémorisée à l'aide de touches latéralisées. Pendant cette phase de reconnaissance, les participants se voyaient présenter soit des éléments placés en première, deuxième, troisième et quatrième position dans la séquence, soit des leurres qui ne faisaient pas partie de la série. La valeur de la réponse associée à chaque main était inversée au cours de la tâche : pour la moitié des essais, les réponses oui/non étaient respectivement attribuées à la main gauche/droite, tandis que les réponses oui/non étaient attribuées à la main droite/gauche pour l'autre moitié de la tâche. Contrairement à notre étude, les participants de la condition non-répétée se sont vus présenter des séquences aléatoires entre les essais. Les participants ont mémorisé un total de 60 séquences (30 séquences par assignation réponse/main), ce qui diffère légèrement de l'étude actuelle où les participants ont effectué 64 essais au total. Une autre différence est que la tâche non-répétée n'avait pas été conçue pour être divisée en deux blocs homogènes pour l'analyse statistique. Pour correspondre aux deux blocs implémentés dans notre étude, les données non-répétées ont été divisées en deux sous-ensembles de 15 essais, et ce pour chaque main. Il convient de noter que, ce découpage n'ayant pas été anticipé dans l'expérience non-répétée, le nombre de tests par position n'était pas équitablement réparti entre les deux blocs. Cependant, suffisamment de données restaient disponibles pour l'analyse du SPoARC, dans la mesure où les temps de réponse moyens ont pu être calculés pour les deux mains et pour chaque position dans chacun des blocs. De plus, les modèles linéaires mixtes généralisés, tolérant les données manquantes, se sont avérés suffisamment puissants pour détecter un SPoARC significatif. Il convient également de préciser que, du point de vue du participant, la création a posteriori des blocs dans la tâche non-répétée est peu susceptible de compromettre la validité de nos comparaisons : notre tâche répétée ne comportait aucun repère visuel ou aucune pause dans la procédure qui aurait pu permettre aux participants d'identifier le passage d'un bloc à l'autre au cours des essais.

Analyses statistiques

Analyses préliminaires Les données non-répétées ont été analysées en utilisant la même procédure statistique que celle appliquée précédemment. Sur l'ensemble de la tâche, la proportion de réponses correctes était égale à .94 ($ET = .03$, $min = .85$, $max = .98$). Une winsorisation des temps de réponse a d'abord été appliquée en tenant compte des temps de réaction aux items cibles et aux items leurres. Une analyse de ces temps de réponse en fonction du numéro d'essai a ensuite été implémentée pour chaque session expérimentale (correspondant à une assignation réponse/main donnée). Les pentes de régression obtenues suite à cette analyse ont révélé une diminution significative des temps de réponse uniquement dans la seconde session ($\beta = -4$, $t(1039) = -3.88$, $p < .001$, $Std.\beta = -0.09$ contre $\beta = -0.76$, $t(1010) = -0.67$, $p = .506$, $Std.\beta = -0.02$ pour la première session, voir la Figure D.2). De plus, la seconde session était caractérisée par des temps de réponse globalement plus longs comparés à la première session ($t(29) = -2.72$, $p = .011$, d de Cohen $= -0.50$). Dans chaque bloc, un pattern inverse à celui mis en évidence sur nos données répétées a été observé : une diminution des temps de réponse n'était pas visible dans la première partie de la tâche ($\beta_{\text{Bloc 1}} = 0.02$, $t(1025) = 0.01$, $p = .994$, $Std.\beta < .001$), tandis qu'une pente significative a pu être identifiée pour le deuxième bloc ($\beta_{\text{Bloc 2}} = -5$, $t(1024) = -2.18$, $p = .030$, $Std.\beta = -0.05$).

Pour analyser l'effet SPoARC, les temps de réponse obtenus aux items cibles ont été winsorisés en remplaçant les valeurs extrêmes par leurs limites supérieure/inférieure (situées à $\pm$ 2 écart-types de la moyenne de chaque participant). Au total, 4.5% des données ont été remplacées. Le temps de réponse moyen sur l'ensemble de la tâche était égal à 959 ms ($ET = 384$ ms). Une analyse de corrélation exécutée entre le taux de réussite et les temps de réponse n'a pas révélé que les participants tendaient à privilégier la vitesse au détriment de l'exactitude ($\rho = 0.23$, $p = .189$, $N = 35$).

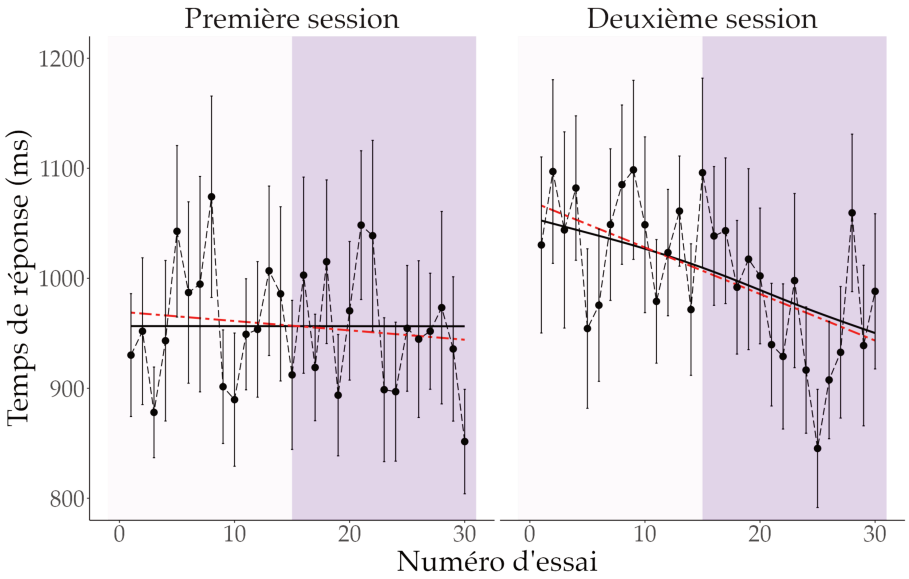


FIGURE D.2 – Moyenne et régression linéaire des temps réponse (exprimés en millisecondes) en fonction du numéro d'essai pour chaque session des données non-répétées analysées dans l'Expérience 8 (données tirées de Vivion et al., 2025b, Exp.1). *Note.* Chaque session était associée à une seule assignation réponse/main (i.e., oui/main gauche et non/-main droite pour la première session, contre oui/main droite et non/main gauche pour la deuxième session, contrebalancé entre les participants). Les pentes de régression calculées pour chaque session sont représentées en rouge. Le dégradé violet en arrière-plan délimite deux blocs. Les barres d'erreur correspondent à ± 1 Erreur Standard.

Modèles linéaires mixtes généralisés Un test de distribution *fitDist* a indiqué que les temps de réponse de la condition non-répétée étaient correctement modélisés par une distribution Gamma, qui a donc été utilisée comme distribution de référence dans les modèles linéaires mixtes généralisés (la distribution des temps de réponse est visible sur la Figure D.3). Les modèles ont été créés en suivant la même procédure que dans la condition répétée (pour une description, voir le Tableau D.2 en Annexe D). Le modèle classé premier ($M5_{NR}$) ne différait pas significativement du modèle classé en deuxième position ($M8_{NR}$, $\chi^2(3) = 0.19$, $p = .98$). Ce deuxième modèle a été retenu pour l'analyse car il incluait l'interaction Position × Main × Bloc d'intérêt, et car il différait significativement du modèle classé en troisième position ($M4_{NR}$, $\chi^2(4) = 10.54$, $p = .032$).

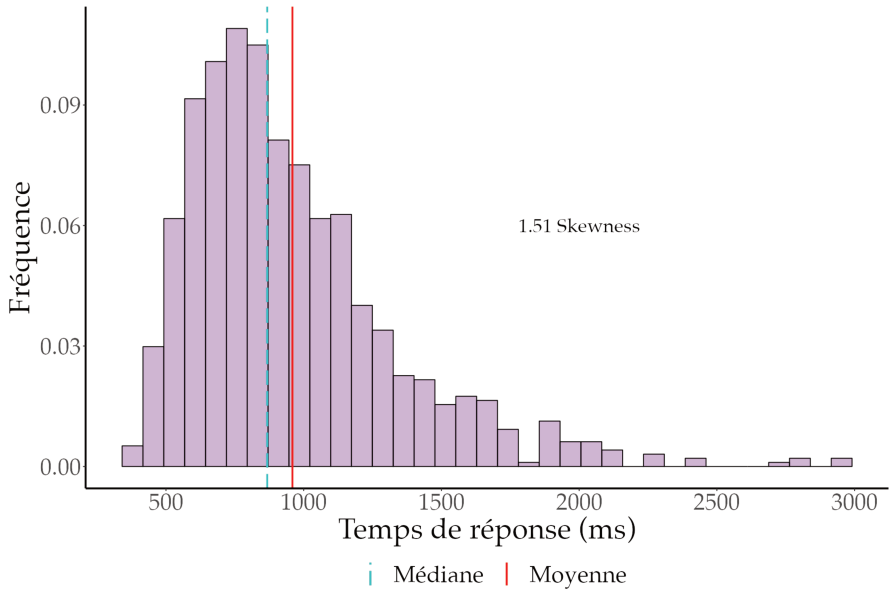


Figure D.3 – Histogramme des temps de réponse après winsorisation des données non-répétées analysées dans l'Expérience 8 (données tirées de Vivion et al., 2025b, Exp.1)

Les résultats du modèle $M8_{NR}$ ont indiqué un effet significatif de la position de l'item ($\beta = -37.84$, $ES = 7.23$, $t(961) = -5.24$, $p < .001$, $Std.\beta = -43.14$), de la main de réponse ($\beta = -56.57$, $ES = 14.02$, $t(961) = -4.04$, $p < .001$, $Std.\beta = 49.20$) et du bloc ($\beta = -29.74$, $ES = 13.47$, $t(961) = -2.21$, $p = .027$, $Std.\beta = -39.83$) sur les temps de réponse. Le numéro de bloc n'a pas interagi significativement avec le facteur Position ($\beta = -3.94$, $ES = 7.57$, $t(961) = -0.52$, $p = .603$, $Std.\beta = -4.39$) et a interagi marginalement avec le facteur Main ($\beta = -28.34$, $ES = 15.84$, $t(961) = -1.79$, $p = .074$, $Std.\beta = -11.72$). Une spatialisation était observable durant la tâche non-répétée, comme en témoigne l'interaction significative entre la main de réponse et la position dans la séquence ($\beta = 41.27$, $ES = 7.73$, $t(961) = 5.34$, $p < .001$, $Std.\beta = 47.12$). Cependant, l'interaction de second ordre entre la main, la position et le bloc n'a pas atteint le seuil de significativité ($\beta = 6.46$, $ES = 10.41$, $t(961) = 0.62$, $p = .535$, $Std.\beta = 7.26$), suggérant que le SPoARC n'a pas significativement différé entre la première et la deuxième partie de la tâche. Les temps de réponse moyens obtenus pour chaque position et chaque main de réponse en considérant l'ensemble de la tâche et chacun des deux blocs séparément sont fournis dans le Tableau D.5 plus haut dans cette Annexe.

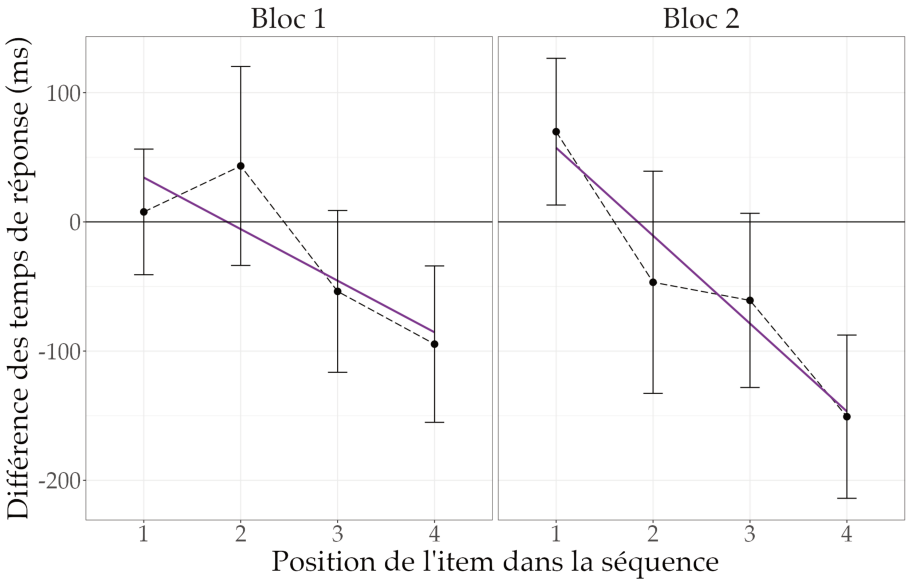


FIGURE D.4 – Régression linéaire de la différence des temps de réponse moyens (d_{TR}) entre main droite et main gauche en fonction de la position de l'item et du bloc pour les données non-répétées analysées dans l'Expérience 8 (données tirées de Vivion et al., 2025b, Exp.1). *Note.* La figure a été réalisée sur les données agrégées par position et par sujet, et les barres d'erreur correspondent à ± 1 Erreur Standard.

Régression linéaire La variation du SPoARC dans la condition non-répétée a également été examinée à l'aide d'une régression linéaire. Le modèle exécuté sur l'ensemble de la tâche a montré un effet SPoARC significatif, les d_{TR} diminuant significativement de 43 ms par position ($d_{TR-P1} = 24$ ms, $ET = 291$ ms, $d_{TR-P2} = -32$ ms, $ET = 274$ ms, $d_{TR-P3} = -35$ ms, $ET = 247$ ms, $d_{TR-P4} = -120$ ms, $ET = 210$ ms ; $t(136) = -2.49$, $p = .014$, $Std.\beta = -0.19$). Une analyse de régression a également été effectuée sur chaque bloc séparément pour établir un parallèle entre les modèles de spatialisation exécutés dans la première et la deuxième partie de notre tâche répétée. Concernant le Bloc 1, les résultats ont indiqué que la pente de régression différait marginalement de zéro ($d_{TR-P1} = 8$ ms, $ET = 266$ ms, $d_{TR-P2} = 43$ ms, $ET = 400$ ms, $d_{TR-P3} = -54$ ms, $ET = 343$ ms, $d_{TR-P4} = -95$ ms, $ET = 332$ ms ; $\beta = -43$, $t(113) = -1.71$, $p = .089$, $Std.\beta = -0.15$). Aucun effet significatif n'a été mis en évidence en considérant uniquement la première et la dernière position ($\beta = -103$, $t(56) = -1.43$, $p = .158$, $Std.\beta = -0.17$) ou en testant chaque position séparément (tous les $|t| \leq 1.56$, tous les $p \geq .129$, tous les $|d|$ de Cohen ≤ 0.29). En revanche, un effet SPoARC était visible pour la seconde moitié de l'expérience, la pente obtenue pour le Bloc 2 ayant significativement différé de zéro ($d_{TR-P1} = 70$ ms, $ET = 295$ ms, $d_{TR-P2} = -47$ ms, $ET = 403$ ms, $d_{TR-P3} = -61$ ms, $ET = 381$ ms, $d_{TR-P4} = -151$ ms, $ET = 340$ ms ; $\beta = -66$, $t(106) = -2.28$, $p = .025$, $Std.\beta = -0.21$, voir la Figure D.4).

Tableau D.7 – Tableau de contingence croisant le nombre de séquences identifiées lors du rappel à long terme indicé et les profils de spatialisation des participants de l'Expérience 8

Séquences identifiées	Pente Négative		Absence d'effet		Pente Positive	
0	0	(0%)	1	(100%)	0	(0%)
1	3	(50%)	1	(17%)	2	(33%)
2	15	(56%)	10	(37%)	2	(7%)

Note. Sur les 37 participants de cette étude, 34 ont pu être recontactés pour finaliser l'étude avec une tâche de rappel à long terme.

D.2 Expérience 9

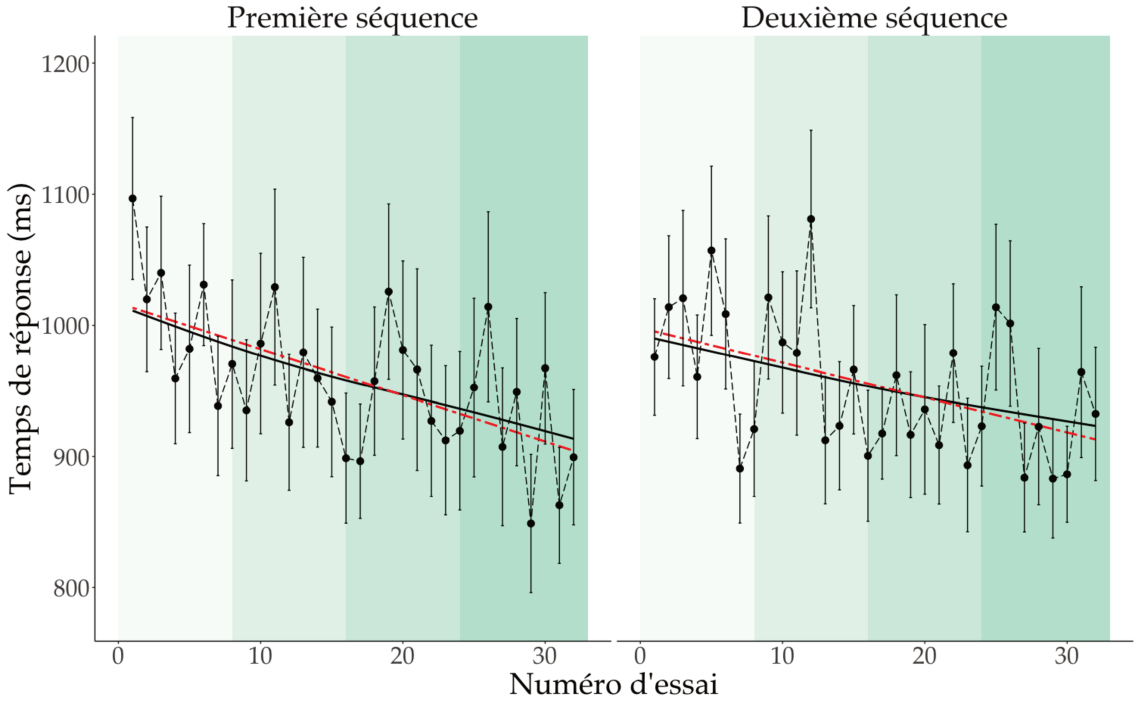


FIGURE D.5 – Moyenne et régression linéaire des temps réponse (exprimés en millisecondes) en fonction du numéro d'essai pour chaque séquence répétée de l'Expérience 9. *Note.* Chaque séquence était associée à une seule assignation réponse/main (i.e., oui/main gauche et non/main droite pour la première séquence, contre oui/main droite et non/main gauche pour la deuxième séquence, contrebalancé entre les participants). Les pentes de régression calculées pour chaque séquence sont représentées en rouge. Le dégradé vert en arrière-plan délimite quatre sous-blocs. Les barres d'erreur correspondent à ± 1 Erreur Standard.

Tableau D.8 – Modèles linéaires mixtes généralisés de l'Expérience 9

$M0$	$\longleftarrow$	TR $\sim$ (1|S)
$M1$	$\longleftarrow$	TR $\sim$ (1|I) + (1|S)
$M2$	$\longleftarrow$	TR $\sim$ Position + (1|I) + (1|S)
$M3$	$\longleftarrow$	TR $\sim$ Position + Main + (1|I) + (1|S)
$M4$	$\longleftarrow$	TR $\sim$ Position + Main + Bloc + (1|I) + (1|S)
$M5$	$\longleftarrow$	TR $\sim$ Position $\times$ Main + Bloc + (1|I) + (1|S)
$M6$	$\longleftarrow$	TR $\sim$ Position $\times$ Bloc + Main + (1|I) + (1|S)
$M7$	$\longleftarrow$	TR $\sim$ Bloc $\times$ Main + Position + (1|I) + (1|S)
$M8$	$\longleftarrow$	TR $\sim$ Position $\times$ Main $\times$ Bloc + (1|I) + (1|S)

Note. TR = Temps de Réponse, Position = Position de l'item dans la séquence, Main = Main de réponse, Bloc = Numéro de bloc ou Numéro de sous-bloc, I = Item et S = Sujet. Dans le texte, nous utilisons les indices M_R et M_{NR} pour distinguer respectivement les séquences répétées des séquences non-répétées. Les modèles implémentés pour l'analyse par sous-bloc sont indicés par M_{SB}.

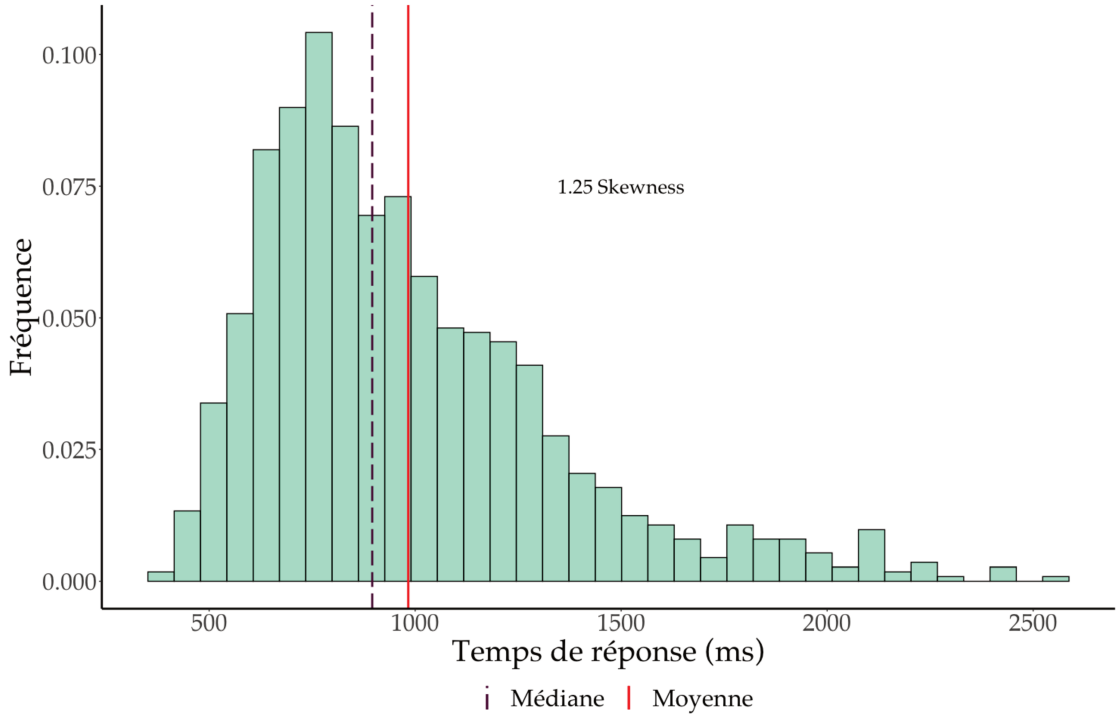


Figure D.1 – Histogramme des temps de réponse de l'Expérience 9 après winsorisation

Tableau D.9 – Classement des modèles linéaires mixtes généralisés implémentés sur les données répétées de l'Expérience 9 selon leur nombre de paramètres (K), l'AICc, le delta AICc et le poids (AICcWt)

Modèles	K	$AICc$	$\Delta AICc$	$AICcWt$
$M1_R$	4	15758.02	0.00	0.40
$M2_R$	5	15760.00	1.99	0.15
$M5_R$	8	15760.59	2.58	0.11
$M6_R$	8	15760.80	2.79	0.10
$M3_R$	6	15760.85	2.84	0.10
$M4_R$	7	15761.46	3.44	0.07
$M7_R$	8	15763.40	5.38	0.03
$M0_R$	3	15763.61	5.60	0.02
$M8_R$	11	15763.93	5.92	0.02

Note. Pour une description de chaque modèle, voir le Tableau D.8.

Tableau D.10 – Résultats du modèle $M8_R$ pour l'Expérience 9

Effet	Estimation	ES	t	p	$\beta Std.$
Intercept	977.27	14.65	66.73	$< .001$	-
Position	32.39	9.58	3.38	$< .001$	−0.77
Main	33.43	15.83	2.11	.035	8.47
Bloc	36.84	12.50	2.95	$< .003$	−9.05
Position × Bloc	−22.01	5.66	−3.89	$< .001$	−12.27
Main × Bloc	2.56	10.42	0.25	.806	−2.37
Position × Main	−7.20	8.59	−0.84	$< .402$	−12.87
Position × Main × Bloc	−2.89	5.49	−0.53	.599	−1.52

Note. ES = Erreur Standard, Position = Position de l'item dans la séquence, Main = Main de réponse et Bloc = Numéro de bloc.

Tableau D.11 – Temps de réponse moyens (et écart-type) en fonction de la position de l'item et de la main de réponse, sur l'ensemble de la tâche et pour chacun des deux blocs consécutifs de l'Expérience 9, d'abord pour les séquences répétées, puis pour les données non-répétées de l'Expérience 6

Position	Pour l'ensemble des blocs		Bloc 1		Bloc 2	
	Main droite	Main gauche	Main droite	Main gauche	Main droite	Main gauche
			Séquences répétées			
1	1020 ms (355)	963 ms (391)	999 ms (327)	932 ms (394)	1041 ms (383)	991 ms (389)
2	975 ms (330)	962 ms (351)	980 ms (298)	981 ms (373)	969 ms (359)	944 ms (328)
3	997 ms (372)	970 ms (367)	1054 ms (363)	985 ms (358)	943 ms (375)	955 ms (377)
4	976 ms (385)	1003 ms (397)	999 ms (424)	1019 ms (414)	953 ms (345)	987 ms (382)
			Séquences non-répétées			
1	1286 ms (498)	1203 ms (454)	1230 ms (417)	1182 ms (390)	1344 ms (570)	1224 ms (514)
2	1268 ms (438)	1303 ms (506)	1219 ms (371)	1316 ms (486)	1327 ms (506)	1291 ms (529)
3	1309 ms (542)	1272 ms (468)	1323 ms (569)	1375 ms (517)	1295 ms (515)	1180 ms (402)
4	1065 ms (413)	1210 ms (471)	998 ms (362)	1179 ms (455)	1145 ms (456)	1236 ms (485)

Tableau D.12 – Temps de réponse moyens (et écart-type) en fonction de la position de l'item et de la main de réponse pour chacun des quatre sous-blocs consécutifs de l'Expérience 9

Position	Sous-bloc 1		Sous-bloc 2		Sous-bloc 3		Sous-bloc 4	
	Main droite	Main gauche	Main droite	Main gauche	Main droite	Main gauche	Main droite	Main gauche
1	935 ms (296)	964 ms (446)	1060 ms (346)	897 ms (333)	1008 ms (374)	1027 ms (417)	1070 ms (393)	940 ms (345)
2	1082 ms (318)	1017 ms (404)	862 ms (226)	944 ms (341)	914 ms (270)	881 ms (287)	1010 ms (412)	1009 ms (359)
3	1022 ms (319)	1001 ms (385)	1077 ms (394)	967 ms (332)	939 ms (330)	1004 ms (418)	949 ms (425)	900 ms (322)
4	1047 ms (417)	983 ms (402)	957 ms (431)	1054 ms (428)	884 ms (269)	1033 ms (368)	1066 ms (424)	940 ms (396)

Tableau D.13 – Différence moyenne des temps de réponse (et écart-type) en fonction de la position dans la séquence, incluant les coefficients de régression, valeurs p et tailles d'effet des modèles linéaires exécutés pour chaque sous-bloc de l'Expérience 9

Sous-bloc	Position	d_{TR}	(ET)	β	p	*Std.*β	p (1 *vs.* 4)	*Std.*β (1 *vs.* 4)
1	1	34	(424)	5.5	.899	0.01	.568	0.08
	2	13	(431)					
	3	70	(361)					
	4	2	(501)					
2	1	73	(363)	-15	.698	-0.04	.193	-0.19
	2	-47	(264)					
	3	127	(522)					
	4	-40	(485)					
3	1	4	(366)	-37	.320	-0.10	.303	-0.16
	2	91	(208)					
	3	-11	(474)					
	4	-133	(507)					
4	1	199	(450)	-55	.216	-0.14	.319	-0.18
	2	-34	(434)					
	3	-74	(299)					
	4	41	(417)					

Note. Les résultats fournissent également la valeur p et la taille d'effet associée au modèle linéaire incluant uniquement les positions extrêmes (1 *vs.* 4).

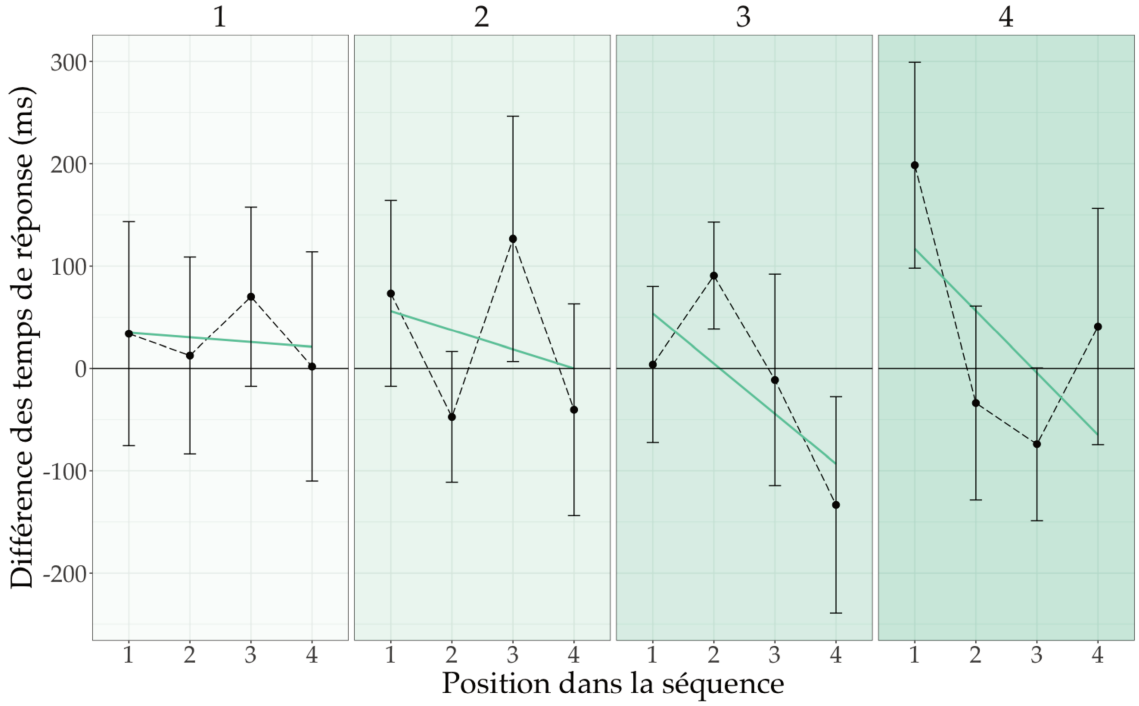


FIGURE D.7 – Régression linéaire de la différence des temps de réponse moyens (d_{TR}) entre main droite et main gauche en fonction de la position de l'item et du sous-bloc pour l'Expérience 9. *Note.* Le dégradé vert en arrière-plan délimite quatre sous-blocs consécutifs. La figure a été réalisée sur les données agrégées par position et par sujet et les barres d'erreur correspondent à ± 1 Erreur Standard.

Analyse D.2

Analyse comparative de données non-répétées (Expérience 9)

Description des données

L'échantillon d'élèves de CM2 rencontrés dans l'Expérience 6 regroupait 37 enfants (âge moyen = 10.9 ans, ET = 0.31, 30 droitiers, 23 filles). De même que pour l'Expérience 9, les participants ont été rencontrés entre le deuxième et le troisième trimestre de l'année scolaire. Un test t de Student pour échantillons indépendants a montré que les participants de l'Expérience 6 ne différaient pas en âge des participants de l'Expérience 9 ($t(72) = 1.17$, $p = .247$, d de Cohen = 0.27). La tâche utilisée pour mesurer la spatialisation dans l'Expérience 6 était similaire à celle utilisée dans l'Expérience 9 à quelques différences près : dans l'Expérience 6, les participants devaient mémoriser quatre images de fruits présentées dans un ordre aléatoire d'un essai à l'autre. Une autre différence concerne le programme PsychoPy utilisé dans l'Expérience 6, qui n'impliquait aucun aspect ludique. Enfin, l'absence de planification a priori d'une division par bloc dans l'Expérience 6 a conduit à des déséquilibres dans la répartition du nombre de tests par position au sein des blocs constitués a posteriori. Ces deux blocs ont été construits en séparant les essais d'une session expérimentale (correspondant à une assignation réponse/main donnée) en deux sous-ensembles de 16 essais chacun.

Analyses statistiques

Analyses préliminaires La proportion de réponses correctes sur l'ensemble de la tâche était égale à .84 (ET = .10, min = .66, max = .98), et s'est avérée différente en fonction du bloc. Les participants étaient en effet plus performants sur la première partie des essais (m_{B1} = .86, ET = .10) comparée à la deuxième partie de la tâche (m_{B2} = .82, ET = .13 ; $t(36) = 2.30$, $p = .027$, d de Cohen = 0.38).

Une winsorisation des données a été appliquée à 5% des temps de réponse obtenus pour les items cibles et les items leurres, qui ont ensuite été analysés dans des modèles de régression prenant le numéro d'essai comme variable prédictive. Des premiers modèles ont investigué la dynamique des temps de réponse dans chaque session expérimentale (associée à une assignation réponse/main donnée). À la différence de nos données répétées, qui ont montré une diminution significative des temps de réponse au fil des essais, les données non-répétées n'ont montré aucune évolution dans les temps de

réaction de la première session ($\beta = 0.67$, $t(1130.0432) = 0.52$, $p = .606$, $Std.\beta = 0.01$), et seulement une tendance marginale suggérant un allongement progressif des temps de réponse au cours de la deuxième session ($\beta = 2.59$, $t(1117.150) = 1.86$, $p = .064$, $Std.\beta = 0.05$, voir la Figure D.8). Des modèles réalisés sur chaque bloc (indépendamment de la session expérimentale) n'ont pas non plus montré d'évolution significative des temps de réaction ($\beta = 4$, $t(1129.141) = 1.44$, $p = .148$, $Std.\beta = 0.04$ pour le premier bloc et $\beta = -4$, $t(1118.184) = -1.37$, $p = .171$, $Std.\beta = -0.03$ pour le deuxième bloc).

Les temps de réponse collectés aux essais positifs ont ensuite été winsorisés séparément. Le temps de réponse moyen sur l'ensemble de la tâche était égal à 1237 ms (ET = 480 ms), et les moyennes pour chaque bloc étaient respectivement égales à 1222 ms (ET = 461 ms) et à 1252 ms (ET = 498 ms). Aucune tendance significative à privilégier la vitesse au détriment de l'exactitude n'a été mise en évidence pour les données non-répétées ($\rho = -0.24$, $p = .153$, $N = 37$).

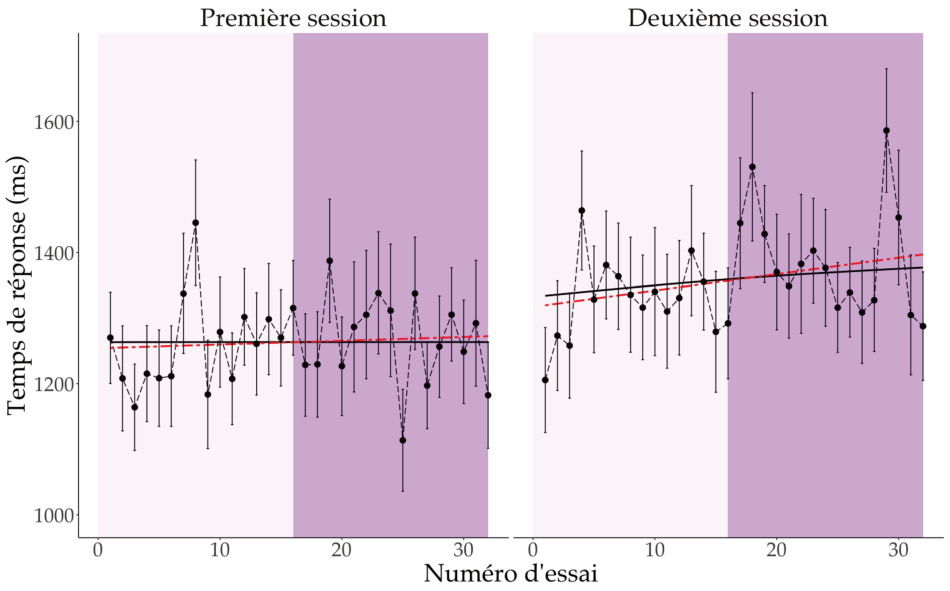


Figure D.8 – Moyenne et régression linéaire des temps réponse (exprimés en millisecondes) en fonction du numéro d'essai pour chaque session des données non-répétées de l'Expérience 6 (ré-analysées dans le cadre de l'Expérience 9 dans un objectif comparatif). *Note.* Chaque session était associée à une seule assignation réponse/main (i.e., oui/main gauche et non/main droite pour la première session, contre oui/main droite et non/main gauche pour la deuxième session, contrebalancé entre les participants). Les pentes de régression calculées pour chaque session sont représentées en rouge. Le dégradé violet en arrière-plan délimite deux blocs. Les barres d'erreur correspondent à ± 1 Erreur Standard.

Modèles linéaires mixtes généralisés Des modèles mixtes généralisés ont été exécutés sur les données non-répétées, en suivant la même logique hiérarchique que celle appliquée jusqu'à présent (voir le Tableau D.8 plus haut dans cette Annexe pour un descriptif des modèles). La modélisation a été réalisée à partir de trois facteurs d'intérêt (Position, Main et Bloc) et de deux facteurs aléatoires (Item et Sujet), et une distribution Gamma a été utilisée comme référence pour les temps de réponse (dont la distribution est visible sur la Figure D.9).

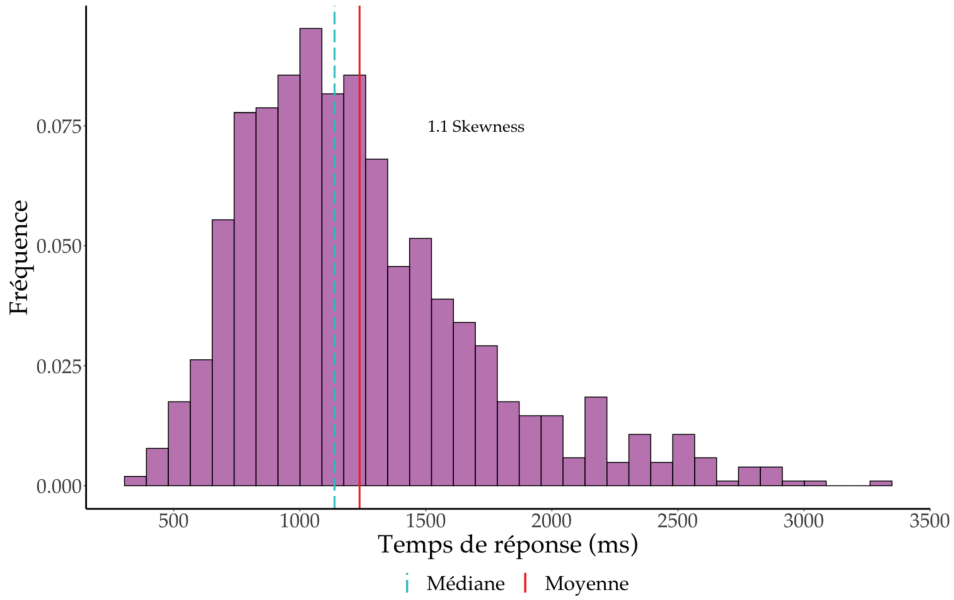


FIGURE D.9 – Histogramme des temps de réponse après winsorisation des données non-répétées de l'Expérience 6 (ré-analysées dans le cadre de l'Expérience 9 dans un objectif comparatif)

Le classement des modèles sur la base de leur AIC a identifié le modèle $M2_{NR}$ (rendant compte d'un effet principal du facteur Position) comme reflétant le plus fidèlement les données. Cependant, ce premier modèle ne différait pas significativement du modèle classé second ($M5_{NR}$, $\chi^2(2) = 5.79$, $p = .122$), qui rendait quant à lui compte de l'interaction Position × Main caractéristique du SPoARC. Ce modèle a été retenu pour l'analyse, dans la mesure où il différait marginalement du modèle classé troisième ($M3_{NR}$, $\chi^2(2) = 5.35$, $p = .069$). Dans l'analyse détaillée du modèle $M5_{NR}$, un effet significatif de la Position a été identifié, les temps de réponse ayant été plus longs pour les premiers items que pour le dernier élément mémorisé ($m_{P1} = 1245$ ms, $ET = 478$ ms, $m_{P2} = 1286$ ms, $ET = 473$ ms, $m_{P3} = 1291$ ms, $ET = 506$ ms, $m_{P4} = 1136$ ms, $ET = 447$ ms ; $\beta = -27.42$, $ES = 8.86$, $t(1021) = -3.10$, $p = .002$, $Std.\beta = -30.77$). Un effet significatif de la main de réponse a également été identifié, révélant des réponses plus rapides de la main droite que de la main gauche ($m_D = 1228$ ms, $ET = 484$ ms,

m_G = 1247 ms, ET = 476 ms ; β = 52.81, ES = 13.72, $t(1021) = 3.85$, $p < .001$, $Std.\beta = -5.62$). Bien que les temps de réponse aient descriptivement différé entre les blocs, la tendance ne s'est pas avérée significative (m_{B1} = 1222 ms, ET = 461 ms, m_{B1} = 1252 ms, ET = 498 ms ; β = 9.32, ES = 12.85, $t(1021) = 0.73$, $p = .468$, $Std.\beta = 4.67$). En revanche, l'interaction Position × Main a atteint le seuil de significativité, révélant un effet SPoARC dans cet échantillon ($\beta = -22.85$, ES = 5.74, $t(1021) = -3.98$, $p < .001$, $Std.\beta = -25.65$). À titre exploratoire, l'interaction Position × Main × Bloc a été investiguée dans le modèle $M8_{NR}$ (classé quatrième dans la table d'AIC). Bien que le modèle sous-jacent ne reflétait pas de manière suffisamment parcimonieuse les données collectées (selon son classement AIC), cette interaction s'est néanmoins avérée significative, suggérant que le SPoARC a pu fluctuer au cours de la tâche non-répétée ($\beta = 23.26$, ES = 7.32, $t(1018) = 3.18$, $p = .002$, $Std.\beta = 13.05$).

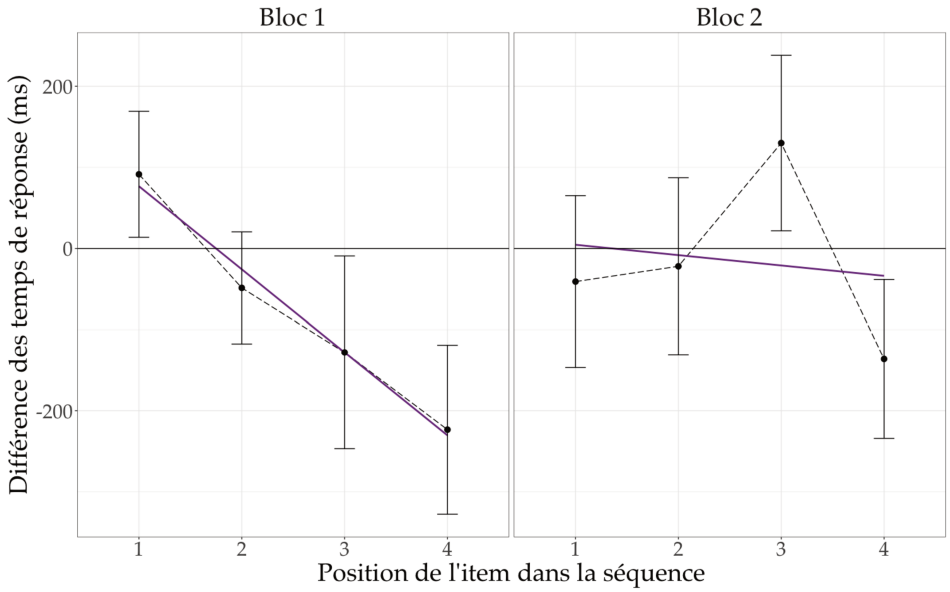


Figure D.10 – Régression linéaire de la différence des temps de réponse moyens (d_{TR}) entre main droite et main gauche en fonction de la position de l'item et du bloc pour les données non-répétées de l'Expérience 6 (ré-analysées dans le cadre de l'Expérience 9 dans un objectif comparatif). *Note.* La figure a été réalisée sur les données agrégées par position et par sujet, et les barres d'erreur correspondent à ± 1 Erreur Standard.

Régression linéaire La fluctuation du SPoARC au cours de la tâche non-répétée a été confirmée dans l'analyse de régression linéaire effectuée sur les différences de temps de réponse entre main droite et main gauche. Un SPoARC significatif a tout d'abord pu être détecté en considérant l'ensemble des données, comme déjà mis en évidence dans l'Expérience 6 (d_{TR-P1} = 22 ms, ET = 368 ms, d_{TR-P2} = −31 ms, ET = 387 ms, d_{TR-P3} = 21 ms, ET = 477 ms, d_{TR-P4} = −142 ms, ET = 449 ms ; $t(108.80) = -2.18$, $p = .032$, $Std.\beta = -0.13$). Par ailleurs, une variation dans les patterns de spatialisation

a été identifiée en considérant les données segmentées par bloc. Sur les 16 premiers essais, une spatialisation significative a pu être mise en évidence, les d_{TR} diminuant en moyenne de 104 ms pour chaque position ($d_{TR-P1} = 92$ ms, $ET = 425$ ms, $d_{TR-P2} = -49$ ms, $ET = 372$ ms, $d_{TR-P3} = -128$ ms, $ET = 651$ ms, $d_{TR-P4} = -223$ ms, $ET = 580$ ms ; $\beta = -104$, $t(84.70) = -3.42$, $p < .001$, $Std.\beta = -0.22$). En revanche, le SPoARC ne s'est pas avéré détectable dans la seconde moitié de la tâche, que ce soit en calculant la pente sur l'ensemble des positions ($d_{TR-P1} = -41$ ms, $ET = 571$ ms, $d_{TR-P2} = -22$ ms, $ET = 618$ ms, $d_{TR-P3} = 130$ ms, $ET = 612$ ms, $d_{TR-P4} = -136$ ms, $ET = 537$ ms ; $\beta = -19$, $t(90.04) = -0.48$, $p = .633$, $Std.\beta = -0.03$), ou en considérant uniquement les deux positions les plus extrêmes ($\beta = -94$, $t(29.76) = -0.70$, $p = .488$, $Std.\beta = -0.09$), ou encore en analysant de manière plus fine chaque d_{TR} séparément (tous les $|t| \leq 1.38$, tous les $p \geq .175$, tous les $|d|$ de Cohen ≤ 0.25). La Figure D.10 rend compte des pentes obtenues dans chacun des blocs pour les données non-répétées.

Analyse D.3

Relation entre spatialisation et apprentissage (Expérience 9)

Apprentissage immédiat

Une première série d'analyses a examiné le lien entre la spatialisation et l'apprentissage immédiat de la séquence répétée durant la tâche. Un indice d'apprentissage a été estimé pour chaque participant sur la base du coefficient de régression des temps de réponse en fonction du numéro d'essai (allant de 1 à 32). Cet indice a été mis en relation avec un indice de spatialisation, correspondant aux pentes individuelles de spatialisation calculées sur le premier bloc. L'indice de spatialisation a tout d'abord été considéré dans sa valeur absolue, afin d'apprécier l'effet d'un traitement spatial des items, quel que soit son orientation. L'indice d'apprentissage moyen était égal à -2.92 ($ET = 5$, $min = -19.24$, $max = 5.68$) et l'indice de spatialisation moyen en valeur absolue était égal à 101.89 ($ET = 106.31$, $min = 3.98$, $max = 472.17$). Les résultats n'ont pas indiqué que les participants ayant spatialisé en début de tâche tendaient également à présenter une plus forte courbe d'apprentissage ($\rho = -.01, p = .946, N = 37$).

La même analyse a été répliquée en excluant cette fois-ci les participants identifiés comme spatialiseurs inverses par le biais d'une analyse bootstrap. Cinq participants ont été ainsi écartés de l'échantillon, résultant en un effectif de 32 participants[1]. Dans cette analyse, les indices de spatialisation ont été considérés dans leur valeur relative (i.e., un coefficient de plus en plus négatif indiquant une plus forte spatialisation orientée *de gauche à droite*). Dans ce sous-échantillon, l'indice d'apprentissage moyen était égal à -3.35 ($ET = 4.96$, $min = -19.25$, $max = 5.68$) et l'indice de spatialisation moyen était égal à -52 ($ET = 87.48$, $min = -313.70$, $max = 62.35$). Bien que la direction du lien entre spatialisation et courbe d'apprentissage se soit avérée similaire à la tendance identifiée chez l'adulte (i.e., des participants spatialisant davantage l'information de gauche à droite présentaient également une courbe d'apprentissage plus marquée), les résultats n'ont pas atteint le seuil de significativité dans cette neuvième étude ($r = .23, p = .194, N = 32$). Aucune relation n'a également été identifiée en considérant les

[1] Outre ces cinq spatialiseurs inverses, l'analyse bootstrap a révélé qu'uniquement sept participants pouvaient être considérés comme spatialiseurs gauche-droite (soit 19% de l'échantillon total), les 25 participants restants ayant été catégorisés comme non-spatialiseurs (68% de l'échantillon). La répartition des participants entre ces trois profils s'est avérée différente du hasard ($\chi^2(2) = 19.67, p < .001, W$ de Cohen $= 0.73$). Le test binomial visant a tester si les spatialiseurs gauche-droite étaient plus nombreux que les spatialiseurs inverses ne s'est en revanche pas avéré significatif (7 spatialiseurs gauche-droite sur 12 spatialiseurs, $p = .387$, h de Cohen $= 0.12$).

pentes de spatialisation calculées pour la deuxième partie de la tâche, que ce soit en tenant compte des spatialiseurs inverses ($\rho = -.08, p = .608, N = 37$) ou en tenant ces participants en dehors de l'analyse ($r = .04, p = .803, N = 32$).

Apprentissage différé

Une dernière série d'analyses a tenté de mettre en lien la spatialisation et la consolidation à long terme en tenant compte des performances lors de la tâche de rappel libre et de rappel indicé exécutée un mois après la mesure du SPoARC. Des premières corrélations ont été exécutées entre les indices de spatialisation calculés sur la première partie de la tâche et le nombre total d'items rappelés par les participants lors du test spontané. Cette analyse a été exécutée d'abord sur les scores liés à l'item (correspondant au nombre total d'items rappelés indépendamment de leur position). Les résultats n'ont indiqué aucune relation significative entre les deux mesures, que ce soit en tenant compte des spatialiseurs inverses ($\rho = .20, p = .26, N = 34$) ou en excluant ces participants de l'analyse ($\rho = -.08, p = .67, N = 30$). Cette absence d'effet a aussi été observée en tenant compte du nombre total d'items rappelés à leur bonne position ($\rho = .08, p = .63, N = 34$ en tenant compte des spatialiseurs inverses, et $\rho = -.34, p = .07, N = 30$ en écartant ces participants de l'échantillon). Dans un dernier temps, des tests exacts de Fisher ont été exécutés pour examiner si la distribution des participants ayant identifié soit deux, une seule ou aucune série cible lors du rappel indicé différait en fonction de leur profil de spatialisation. Les résultats n'ont pas permis d'identifier un lien significatif entre les deux distributions, que ce soit en tenant compte des trois profils de spatialisation ($p = .953$, voir le Tableau D.14), en considérant une répartition binaire des participants selon l'absence ou la présence d'une spatialisation quelle que soit son orientation ($p = .860$), ou encore en opposant les spatialiseurs gauche-droite au reste de l'échantillon ($p = 1$).

Tableau D.14 – Tableau de contingence croisant le nombre de séquences identifiées lors du rappel à long terme indicé et les profils de spatialisation des participants de l'Expérience 9

Séquences identifiées	Pente Négative		Absence d'effet		Pente Positive	
0	1	(20%)	3	(60%)	1	(20%)
1	4	(17%)	17	(71%)	3	(12%)
2	1	(20%)	4	(80%)	0	(0%)

Note. Sur les 37 participants de cette étude, 34 ont pu être recontactés pour finaliser l'étude avec une tâche de rappel à long terme.

D.3 Expérience 10

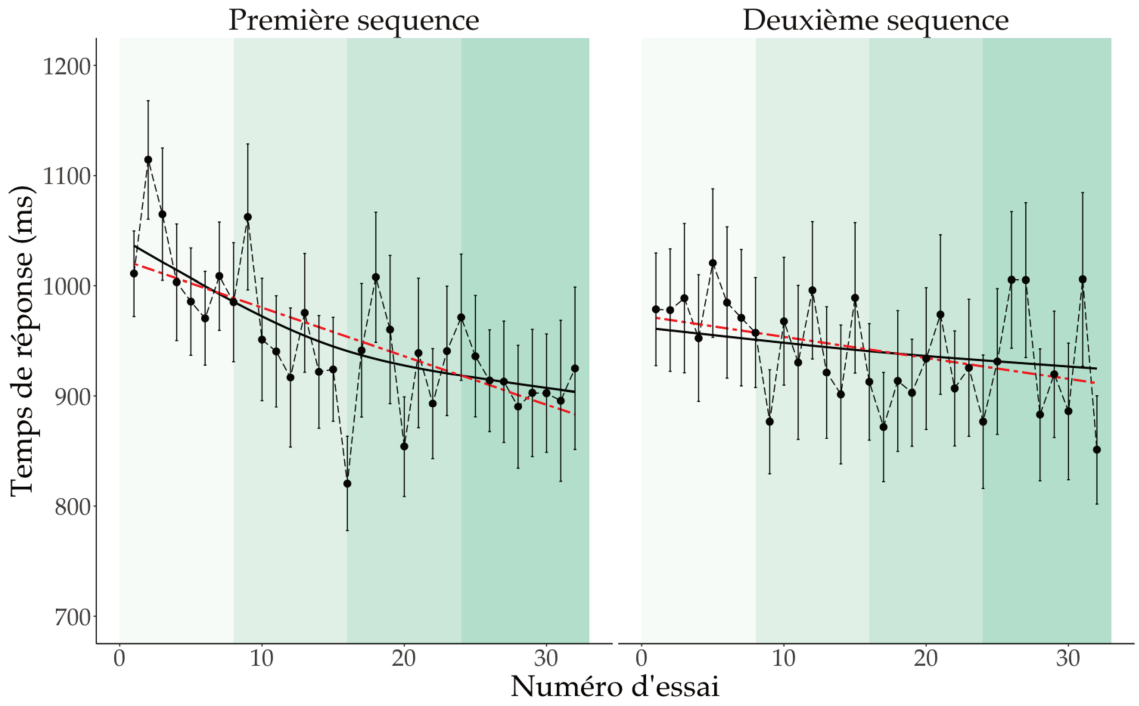


FIGURE D.11 – Moyenne et régression linéaire des temps réponse (exprimés en millisecondes) en fonction du numéro d'essai pour chaque séquence répétée de l'Expérience 10. *Note.* Chaque séquence était associée à une seule assignation réponse/main (i.e., oui/main gauche et non/main droite pour la première séquence, contre oui/main droite et non/main gauche pour la deuxième séquence, contrebalancé entre les participants). Les pentes de régression calculées pour chaque séquence sont représentées en rouge. Le dégradé vert en arrière-plan délimite quatre sous-blocs. Les barres d'erreur correspondent à ± 1 Erreur Standard.

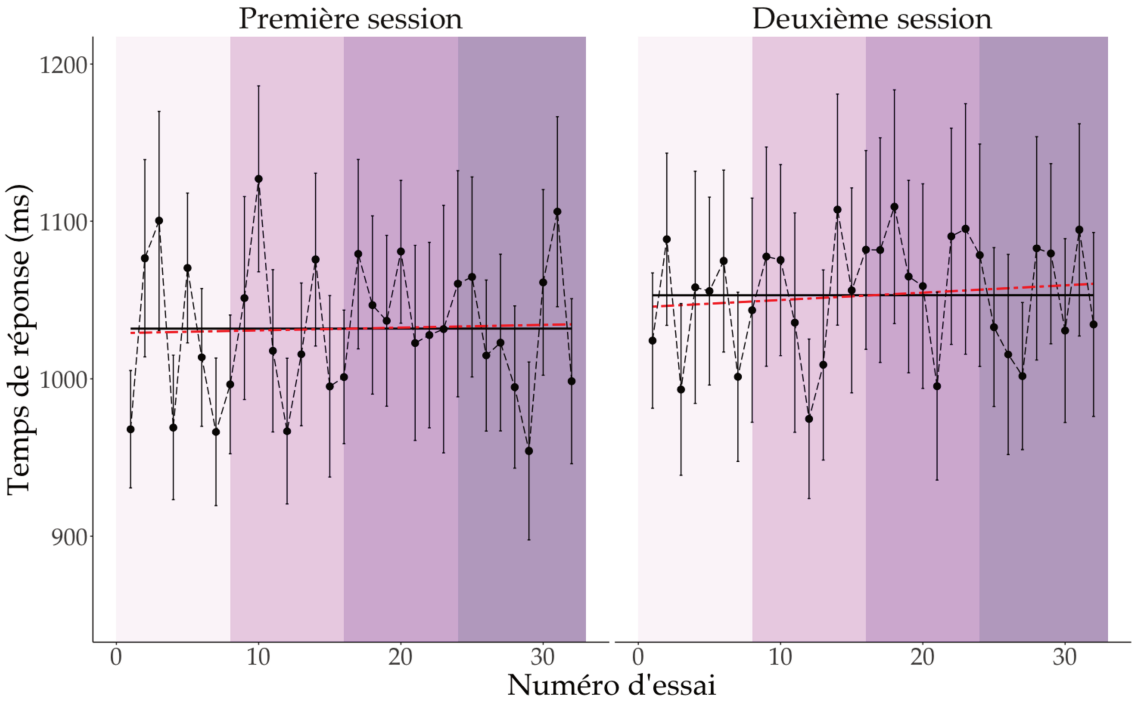


FIGURE D.12 – Moyenne et régression linéaire des temps réponse (exprimés en millisecondes) en fonction du numéro d'essai pour chaque session de la tâche non-répétée de l'Expérience 10. *Note.* Chaque session était associée à une seule assignation réponse/main (i.e., oui/main gauche et non/main droite pour la première session, contre oui/main droite et non/main gauche pour la deuxième session, contrebalancé entre les participants). Les pentes de régression calculées pour chaque session sont représentées en rouge. Le dégradé violet en arrière-plan délimite quatre sous-blocs. Les barres d'erreur correspondent à $\pm$ 1 Erreur Standard.

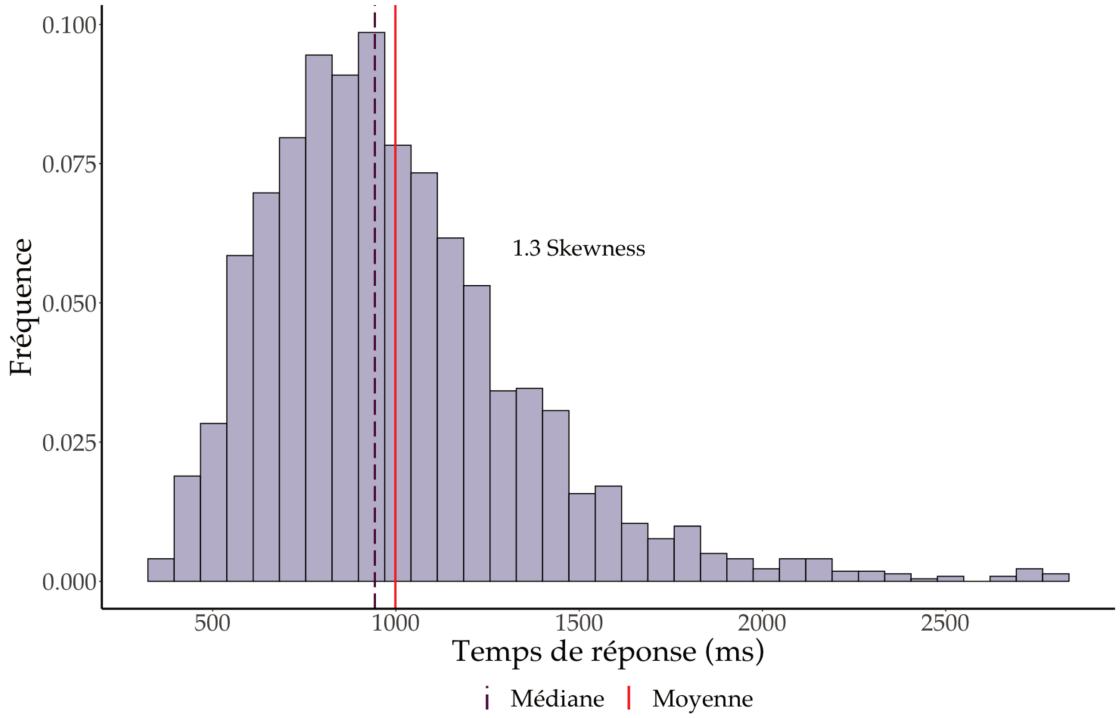


Figure D.13 – Histogramme des temps de réponse de l'Expérience 10 après winsorisation

Tableau D.15 – Modèles linéaires mixtes généralisés de l'Expérience 10

$M0$	$\longleftarrow$ TR $\sim$ (1|S)
$M1$	$\longleftarrow$ TR $\sim$ (1|I) + (1|S)
$M2$	$\longleftarrow$ TR $\sim$ Position + (1|I) + (1|S)
$M3$	$\longleftarrow$ TR $\sim$ Position + Main + (1|I) + (1|S)
$M4$	$\longleftarrow$ TR $\sim$ Position + Main + Bloc + (1|I) + (1|S)
$M5$	$\longleftarrow$ TR $\sim$ Position + Main + Bloc + Séquence + (1|I) + (1|S)
$M6$	$\longleftarrow$ TR $\sim$ Position $\times$ Main + Bloc + Séquence + (1|I) + (1|S)
$M7$	$\longleftarrow$ TR $\sim$ Position $\times$ Bloc + Main + Séquence + (1|I) + (1|S)
$M8$	$\longleftarrow$ TR $\sim$ Position $\times$ Séquence + Main + Bloc + (1|I) + (1|S)
$M9$	$\longleftarrow$ TR $\sim$ Main $\times$ Bloc + Séquence + Position + (1|I) + (1|S)
$M10$	$\longleftarrow$ TR $\sim$ Main $\times$ Séquence + Bloc + Position + (1|I) + (1|S)
$M11$	$\longleftarrow$ TR $\sim$ Bloc $\times$ Séquence + Main + Position + (1|I) + (1|S)
$M12$	$\longleftarrow$ TR $\sim$ Position $\times$ Main $\times$ Bloc + Séquence + (1|I) + (1|S)
$M13$	$\longleftarrow$ TR $\sim$ Position $\times$ Main $\times$ Séquence + Bloc + (1|I) + (1|S)
$M14$	$\longleftarrow$ TR $\sim$ Position $\times$ Séquence $\times$ Bloc + Main + (1|I) + (1|S)
$M15$	$\longleftarrow$ TR $\sim$ Main $\times$ Bloc $\times$ Séquence + Position + (1|I) + (1|S)
$M16$	$\longleftarrow$ TR $\sim$ Position $\times$ Main $\times$ Bloc $\times$ Séquence + (1|I) + (1|S)

Note. TR = Temps de Réponse, Position = Position de l'item dans la séquence, Main = Main de réponse, Bloc = Numéro de bloc ou Numéro de sous-bloc, Séquence = Type de séquence, I = Item et S = Sujet. Les lignes colorées correspondent au modèle classé premier par l'analyse d'AIC. Les modèles implémentés pour l'analyse par sous-bloc sont sont indicés par M_{SB}.

Tableau D.16 – Classement des modèles linéaires mixtes généralisés implémentés sur les données répétées de l'Expérience 10 selon le nombre de paramètres (K), l'AICc, le delta AICc et le poids (AICcWt)

Modèles	K	$AICc$	$\Delta AICc$	$AICcWt$
$M6$	9	31042.21	0.00	0.58
$M2$	5	31045.54	3.34	0.11
$M12$	12	31046.24	4.03	0.08
$M3$	6	31046.71	4.51	0.06
$M13$	12	31047.17	4.97	0.05
$M4$	7	31047.92	5.71	0.03
$M1$	4	31048.98	6.77	0.02
$M5$	8	31049.80	7.59	0.01
$M14$	12	31050.13	7.92	0.01
$M0$	3	31050.70	8.50	0.01
$M7$	9	31050.72	8.51	0.01
$M8$	9	31050.80	8.59	0.01
$M9$	9	31051.08	8.87	0.01
$M11$	9	31051.60	9.40	0.01
$M10$	9	31051.81	9.60	0.00
$M16$	19	31052.56	10.35	0.00
$M15$	12	31056.54	14.34	0.00

Note. La différence de couleur indique la première différence significative détectée entre deux modèles. Pour une description de chaque modèle, voir le Tableau D.15.

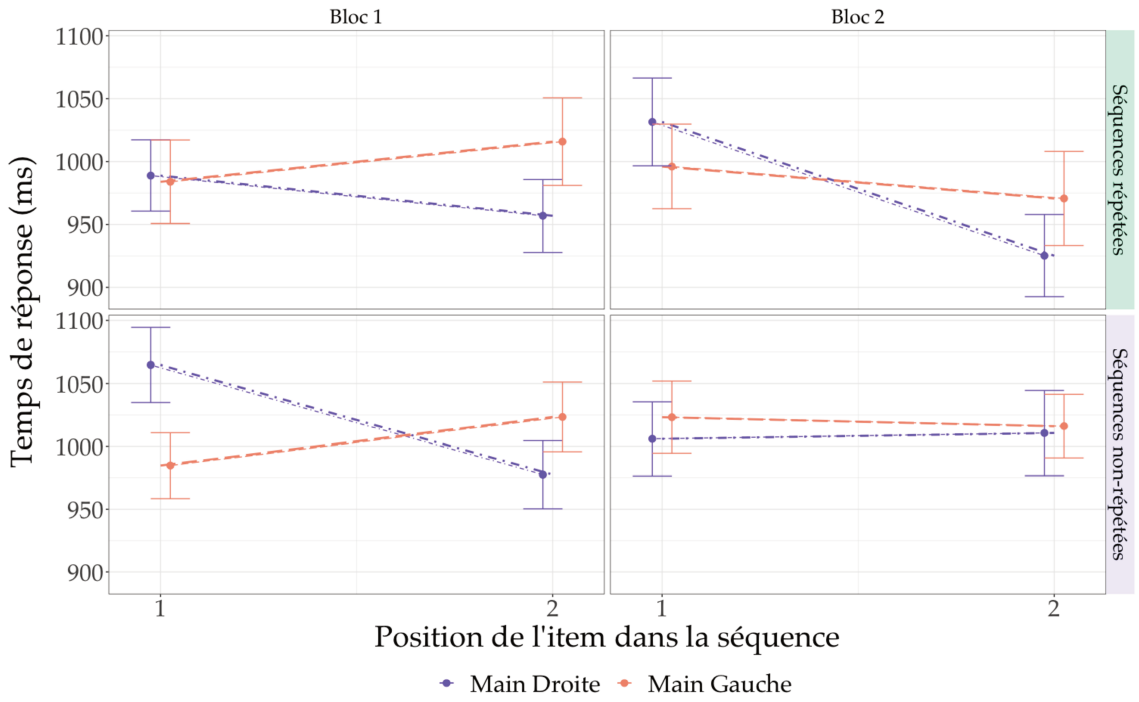


FIGURE D.14 – Moyenne et régression linéaire des temps réponse (exprimés en millisecondes) en fonction de la position de l'item dans la séquence, de la main de réponse, du bloc et du type de séquence mémorisées par les participants de l'Expérience 10. *Note.* Les barres d'erreur correspondent à ± 1 Erreur Standard.

Analyse D.4

Relation entre spatialisation et apprentissage (Expérience 10)

Apprentissage immédiat

Les performances à la tâche répétée ayant rapidement atteint un plateau dès les premiers essais (voir les analyses préliminaires de l'Expérience 10), les capacités d'apprentissage de chaque participant ont été appréciées sur la base d'un indice correspondant au coefficient de régression de ses temps de réponse en fonction du numéro d'essai (un indice de plus en plus négatif indiquant un apprentissage de plus en plus marqué). L'indice de spatialisation correspondait quant à lui au coefficient de régression de la différence des temps de réponse entre main droite et main gauche en fonction de la position dans la séquence, calculé sur la première partie de la tâche uniquement. L'indice de spatialisation a été dans un premier temps considéré dans sa valeur absolue pour évaluer l'impact d'une spatialisation sur la consolidation de l'information sérielle, indépendamment du sens adopté. L'indice d'apprentissage moyen était égal à -3 ($ET = 4.08$, $min = -11.38$, $max = 6.55$) et l'indice de spatialisation moyen en valeur absolue était égal à 227 ($ET = 171.23$, $min = 25.81$, $max = 683.63$). Les résultats n'ont pas indiqué que les participants ayant spatialisé en début de tâche tendaient également à présenter une plus forte courbe d'apprentissage ($r(34) = -.11, p = .523$).

Cette analyse a ensuite été répliquée en excluant cette fois-ci les participants ayant été identifiés comme spatialiseurs inverses à l'issue d'une analyse bootstrap. Quatre participants ont ainsi été tenus hors de l'échantillon[2]. L'indice d'apprentissage moyen pour ce sous-groupe était égal à -3 également ($ET = 4.24$, $min = -11.38$, $max = 6.55$). L'indice de spatialisation a été considéré dans sa valeur relative, un coefficient plus négatif indiquant une spatialisation gauche-droite plus marquée. L'indice de spatialisation moyen était égal à -137 ($ET = 213.75$, $min = -683.63$, $max = 367.76$). Bien qu'une relation positive entre indice de spatialisation et courbe d'apprentissage ait pu être identifiée sur le plan descriptif, la corrélation effectuée entre les deux scores n'a pas atteint le seuil de significativité ($r(30) = .15, p = .428$). L'analyse exécutée en tenant

[2] Outre ces quatre participants, l'analyse bootstrap a permis d'identifier huit spatialiseurs gauche-droite (22 % de l'échantillon), les 24 participants restants n'ayant pas été identifiés comme spatialiseurs (soit 67 % de l'échantillon). La distribution des participants entre ces trois types de spatialisation était différente d'une distribution aléatoire ($\chi^2(2) = 18.67$, $p < .001$, W de Cohen $= 0.72$). En revanche, le test binomial opposant les deux profils de spatialisation n'a permis d'observer une asymétrie significative en faveur d'un codage spatial gauche-droite (8 spatialiseurs gauche-droite sur 12 spatialiseurs, $p = .194$, h de Cohen $= 0.24$).

compte des pentes obtenues dans le deuxième bloc n'a pas non plus conduit à des résultats significatifs en tenant compte des spatialiseurs inverses ($r(34) = .02, p = .916$). En revanche, une tendance marginale a été relevée en écartant ces participants de l'échantillon. À l'inverse des hypothèses posées cependant, les participants qui spatialisaient davantage l'information de gauche à droite dans la deuxième partie de la tâche présentaient également des courbes d'apprentissage moins marquées ($r(30) = -0.31, p = .086$ en tenant les spatialiseurs inverses en dehors de l'analyse).

L'absence de mesure des performances de rappel différé dans cette dernière étude n'a pas permis de conduire d'analyses supplémentaires.