



HAL
open science

Le Trouble Développemental de la Coordination : des difficultés motrices engendrées par des déficits somatosensoriels ?

Marion Naffrechoux

► **To cite this version:**

Marion Naffrechoux. Le Trouble Développemental de la Coordination : des difficultés motrices engendrées par des déficits somatosensoriels?. Sciences cognitives. Université Lumière Lyon2, 2024. Français. NNT: . tel-04928504

HAL Id: tel-04928504

<https://hal.science/tel-04928504v1>

Submitted on 5 Feb 2025

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.



THESE DE DOCTORAT DE
L'UNIVERSITE LUMIERE LYON 2

Ecole doctorale N°476
Neurosciences et Cognition (NSCo)

Discipline : Psychologie cognitive

Le Trouble Développemental de la
Coordination : des difficultés motrices
engendrées par des déficits somatosensoriels ?

Soutenue publiquement le 19 décembre 2024 par :

Marion NAFFRECHOUX

Sous la direction de Alice Catherine ROY et Denis PELISSON

Devant le jury composé de :

JOVER Marianne (PU)	PsyCLE – Univ. Aix-Marseille	Présidente du jury
ASSAIANTE Christine (DR)	LNC – CNRS, Aix-Marseille	Rapporteure
TALLET Jessica (MCU)	ToNIC – Univ. Toulouse	Rapporteure
CAUDRON Sébastien (MCU)	LPNC – Univ. Grenoble Alpes	Examinateur
JOLLY Caroline (CR)	LPNC – CNRS, Grenoble	Examinatrice
FARNE Alessandro (DR)	CRNL – INSERM, Lyon	Examinateur
ROY Alice Catherine (DR)	DDL – CNRS, Lyon	Directrice de thèse
PELISSON Denis (DR)	CRNL – CNRS, Lyon	Co-directeur de thèse

RESUME

Le Trouble Développementale de la Coordination (TDC) correspond à des difficultés motrices, se traduisant par une maladresse, une lenteur et une imprécision des gestes. Malgré sa prévalence importante, son étiologie reste méconnue. L'hypothèse la plus largement décrite dans la littérature est celle d'un déficit des modèles internes sous-tendant la production des mouvements. Des troubles perceptifs ont également été suggérés comme cause possible du TDC. Ainsi, des troubles visuo-spatiaux ont été mis en évidence, mais qui ne peuvent pas expliquer la totalité des troubles moteurs. Quant aux capacités proprioceptives et tactiles -tout aussi essentielles pour le contrôle moteur- leur préservation chez les sujets présentant un TDC a été peu étudiée (perception tactile) ou n'a pas atteint de consensus (proprioception). De plus, la plupart des études qui cherchaient à évaluer ces capacités perceptives ont utilisé une réponse motrice manuelle qui, précisément, est perturbée dans le cadre du TDC, et qui ne permet donc pas d'identifier spécifiquement un trouble perceptif.

L'objectif général de ce travail de thèse est de déterminer si des déficits somatosensoriels sont présents dans le TDC et d'évaluer alors leur rôle dans les difficultés motrices.

La première étape de ce travail a été de créer des tâches expérimentales permettant d'évaluer les capacités proprioceptives et tactiles, sans facteur moteur confondant. Dans ces tâches, les participants devaient localiser une cible somatosensorielle – proprioceptive ou proprio-tactile – avec une réponse manuelle de pointage, mais également avec une réponse oculaire saccadique, le système saccadique étant préservé dans le TDC. Notre première étude a permis de mettre en évidence chez des adultes neurotypiques une forte corrélation entre les réponses manuelles et les réponses oculaires, confirmant la possibilité d'utiliser une réponse oculomotrice pour évaluer des capacités somatosensorielles.

Dans une deuxième étude, nous avons évalué les capacités proprioceptives et tactiles d'enfants présentant un TDC âgés de 9 à 12 ans, par le biais de ces deux tâches de localisation de cibles somatosensorielles. Les enfants avec un TDC se sont montrés moins précis pour localiser des cibles proprioceptives que les enfants au développement typique, et ce quelle que soit la modalité de réponse (manuelle ou oculaire). Ce déficit chez les enfants avec TDC était corrélé avec leurs performances d'équilibre et de lancer et attraper de balles. Un déficit tactile était également mis en évidence, mais il était moins marqué que le déficit proprioceptif et non corrélé à la sévérité des difficultés motrices. En outre, la différence d'erreur sur l'axe horizontal entre

les deux populations, présente dans les deux tâches, suggère une distorsion plus marquée de la représentation de la longueur du bras chez les enfants avec un TDC.

Les difficultés motrices du TDC persistant à l'âge adulte, une troisième étude a été menée afin d'évaluer les capacités proprioceptives et tactiles chez des adultes avec un TDC. Nos résultats préliminaires mettent en évidence un déficit de localisation de cibles proprioceptives, uniquement sur l'axe vertical et pour la modalité de réponse saccadique, suggérant un codage imprécis de l'angle du coude. En revanche, les capacités de localisation tactile étaient similaires à celles des participants contrôles et la représentation de la longueur de l'avant-bras n'était pas affectée chez l'adulte avec TDC.

Ce travail de thèse a donc mis en évidence la présence de déficits perceptifs dans le TDC, notamment dans la modalité proprioceptive. Ce déficit semble prédire la sévérité des difficultés motrices chez l'enfant. Ces résultats sont en faveur d'un changement de cadre théorique du TDC, qui semble être, au moins partiellement, un trouble d'origine perceptive. En considérant les déficits proprioceptifs dans la rééducation, cette meilleure compréhension du TDC pourrait conduire à terme à mieux le prendre en charge.

MOTS-CLES

Trouble neurodéveloppemental, Proprioception, Perception tactile, Pointage manuel, Saccade oculaire.

ABSTRACT

Developmental Coordination Disorder (DCD) corresponds to motor difficulties, resulting in clumsiness, slowness and inaccuracy of gestures. Despite its high prevalence, little is known about its etiology. The most commonly described hypothesis in the literature is an internal modelling deficit underlying movement production. Perceptual disorders have also been suggested as a possible cause of DCD. Among those, visuospatial disorders have been identified, but they cannot explain the whole motor disorder. Regarding proprioceptive and tactile abilities - which are also essential for motor control - their preservation in subjects with DCD has been rarely studied (tactile perception) or is still debated (proprioception). Furthermore, most of the studies that have sought to assess these perceptual abilities have used a manual motor response, i.e. an effector which is precisely disturbed in DCD, therefore preventing, in our view, from specifically identifying a perceptual disorder.

The general aim of this thesis work is to determine whether somatosensory deficits are present in DCD and then to assess their role in motor difficulties.

The first step in this work was to create experimental tasks to assess proprioceptive and tactile abilities, without any confounding motor factor. In these tasks, participants had to localize a somatosensory target - proprioceptive or proprio-tactile - with a manual pointing response, but also with a saccadic ocular response, the saccadic system being preserved in DCD. Our first study showed a strong correlation between manual and ocular responses in neurotypical adults, confirming the possibility of using oculomotor responses to assess somatosensory abilities.

In a second study, we assessed proprioceptive and tactile abilities in children with DCD aged 9 to 12, using these two somatosensory target localization tasks. Children with DCD were less accurate at localizing proprioceptive targets than typically developing children, regardless of the response modality (manual or ocular). This deficit in children with DCD was correlated with their performance in balance control, as well as in ball throwing and catching. A tactile deficit was also found, however less pronounced than the proprioceptive deficit and with no correlation with the severity of motor difficulties. Furthermore, the difference in error on the horizontal axis between the two populations, present in both tasks, suggests a more pronounced distortion in the representation of arm length in children with DCD.

As motor difficulties in DCD persist into adulthood, a third study was conducted to assess proprioceptive and tactile abilities in adults with DCD. Our preliminary results point to a deficit

in proprioceptive target localization, only along the vertical axis and for the saccadic response modality, suggesting an inaccurate coding of the elbow angle. In contrast, tactile localization abilities are similar to those of control participants and the representation of forearm length is not affected in adults with DCD.

This thesis has therefore highlighted the presence of perceptual deficits in DCD, particularly in the proprioceptive modality. This deficit seems to predict the severity of motor difficulties in children. These results call for a change in the theoretical framework of DCD, which appears to be, at least partly, a perceptual disorder. By taking proprioceptive deficits into account in rehabilitation protocols, this better understanding of DCD may ultimately lead to improved interventions.

KEYWORDS

Neurodevelopmental disorder, Proprioception, Tactile perception, Manual pointing, Ocular saccade.

PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES

ARTICLES

- Naffrechoux M., Koun E., Volland F., Farnè A.*, Roy A.C.*, PéliSSon D*. (2024). Eyes and hand are both reliable at localizing somatosensory targets. *Experimental Brain Research*. <https://doi.org/10.1007/s00221-024-06922-8>

- Naffrechoux M., Koun E., Volland F., Farnè A.*, PéliSSon D.*, Roy A.C.* (Manuscript in preparation). Spatial localization of the upper limb using touch and proprioception is altered in children with Developmental Coordination Disorder.

(* Contributions égales)

COMMUNICATIONS ORALES

- Naffrechoux M., Farnè A., Roy A.C., PéliSSon D. (2023). Proprioception et perception tactile dans le Trouble Développemental de la Coordination. *Rencontre nationale de l'association Dyspraxie France Dys*, Lyon, 22 avril 2023.

- Naffrechoux M., Koun E., Farnè A., Roy A.C., PéliSSon D. (2024). **Scholarship winner**. The hand outperforms the eyes at localizing somatosensory targets. *33rd Annual Meeting of the Society for the Neural Control of Movement (NCM)*, Dubrovnik, 16-19 avril 2024.

- Naffrechoux M., Koun E., Farnè A., PéliSSon D., Roy A.C. (2024). Is Developmental Coordination Disorder really a motor deficit? *36th Annual Meeting of the European Academy of Childhood Disability (EACD)*, Bruges, 29 mai-1 juin 2024.

- Naffrechoux M., Farnè A., PéliSSon D., Roy A.C. (2024). Evidence of somatosensory deficits in children with Developmental Coordination Disorder. *15th biannual conference of International Society of Research and Advocacy for Developmental Coordination Disorder – 6th assembly of International Motor Development Research Consortium (DCD15-IMDRC6)*, Ghent, 5-8 juin 2024.

COMMUNICATIONS AFFICHEES

- Naffrechoux M., Koun E., Salemme R., Volland F., Farnè A., Roy A.C., PéliSSon D. (2022). Proprioceptive and tactile localization deficits in children with Developmental Coordination

Disorder. *34th Annual Meeting of the European Academy of Childhood Disability (EACD)*, Barcelone, 18-21 mai 2022.

- Naffrechoux M., Koun E., Salemme R., Volland F., Farnè A., Péliesson D., Roy A.C. (2023). Proprioceptive and tactile localization deficits in children with Developmental Coordination Disorder. *16th International Meeting of the French Neuroscience Society (NeuroFrance)*, Lyon, 24-26 mai 2023.

REMERCIEMENTS

Pour commencer, je remercie tous les membres de mon jury d'avoir accepté d'en faire partie. Merci à Christine Assaiante et Jessica Tallet, qui me font l'honneur d'expertiser ce travail. Merci également à Marianne Jover, Sébastien Caudron et Caroline Jolly, de rejoindre ce jury lors de la soutenance.

Merci à mes directeur.rices de thèse et collaborateur dans ce travail. Tout d'abord, parce que c'est toi qui m'as mis sur la voie de ce travail, merci Alessandro de m'avoir fait confiance en me permettant d'intégrer votre équipe. Je me rappelle encore être sortie de ton cours en M2 en me disant « voilà, c'est ça que je veux faire » ; merci pour ton enthousiasme communicatif pour la recherche. Merci pour tous nos échanges qui ont toujours été très enrichissants. Denis, merci pour ta bienveillance incroyable et ta disponibilité épatante tout au long de cette thèse. J'ai pu compter sur toi pendant ces quatre années, et encore plus ces dernières semaines : merci pour tes retours toujours pertinents, pour ton encadrement et ton aide, qui m'ont permis d'arriver au bout de ce travail. Ton calme et ton optimisme ont de nombreuses fois apaisé mon stress. Enfin, merci à Alice pour nos échanges, pour ton franc-parler parfois déroutant, et merci de toujours m'inciter à rejoindre 'le monde des grands' en me poussant à être autonome et responsable. Je ne suis pas encore sûre de me sentir légitime dans ce monde d'adultes de la recherche mais j'y travaille. Merci à tous les trois d'avoir su m'accompagner dans ce travail, merci de m'avoir fait confiance (peut-être parfois un peu trop !) et de m'avoir laissé l'autonomie dont j'avais besoin. Je suis heureuse d'avoir fait mes premiers pas dans la recherche à vos côtés et j'espère avoir l'occasion de travailler avec vous à l'avenir.

Merci à tous les enfants et adultes pour leur participation, ainsi qu'à leurs familles, qui ont montré une motivation impressionnante, amenant même certains à traverser la France pour participer aux études.

Merci aux membres de mon CSID, Christophe Bourdin, Alice Gomez et Laure Pisella, pour le temps que vous m'avez accordé, pour vos précieux conseils et pour les échanges enrichissants que nous avons pu avoir au cours de ces quatre années.

Merci également aux stagiaires que j'ai pu co-encadrer au cours de cette thèse : Caroline, Madeleine, Eirini, Silvia et Raphaël.

Merci à Fabien Perrin de m'avoir offert l'opportunité d'enseigner pendant cette thèse, cette expérience a été très enrichissante et motivante pour la suite de ma carrière professionnelle.

Même si je n'ai pas été très présente dans ces locaux, merci à tous les membres du labo de DDL. Merci à Rabia pour ta disponibilité et ton aide administrative précieuse. Merci particulièrement à l'équipe de la 'mallette Dys', Véro, Agnès et Jen, que j'ai un peu plus côtoyée pendant cette thèse : merci pour votre bienveillance et pour votre accueil au sein de votre équipe. Mention

spéciale à Jen, merci pour ton aide et ta disponibilité, les petites visios stat m'ont grandement rassurées ! Merci également aux directeurs du labo, Antoine et Françoise.

Merci à Impact, mon labo de cœur pendant ces quatre années. Merci aux gestionnaires pour leur aide administrative, avec une mention particulière pour Sonia : merci pour ta disponibilité et pour ton sourire ! Merci à Cécile pour l'accompagnement de qualité pour toutes les démarches éthiques. Merci aux ingés de l'équipe, et particulièrement à Eric : merci pour ton initiation à Matlab, pour le codage des manips, et surtout merci pour le coaching escalade (bientôt pour le coaching course à pied peut-être) ! Merci Roméo de m'avoir permis de m'évader dans les montagnes le temps d'une discussion, et merci pour l'organisation des randos, on attend la prochaine avec impatience ! Merci à Fred, pour ton efficacité dans la création et la réparation des set up même si les « Fred, tu crois que tu pourrais... » te faisaient parfois un peu peur.

Merci à tous les membres du labo, ITA, chercheurs, post-doc et doctorants, d'avoir fait de cette thèse une expérience professionnelle et personnelle enrichissante et agréable. Merci aux directeur.rices du labo, Alessandro, Denis et Fadila, de rendre l'ambiance si sereine au sein de cette équipe. Merci à Marine pour tes mots toujours bienveillants et plein de soutien dans les moments de fatigue ou de stress. Merci à Malika, c'était vraiment chouette de se serrer les coudes pendant cette fin de thèse ; merci à Romaric, Ali, Tzuyi, Gaiqing, Kenza et tous les autres. Merci aux anciens d'Impact : Leslie (merci de m'avoir gentiment légué ton bureau), Audrey, Alexis, Camille, Bertrand, Amélie. Merci à Marie, on ne s'est pas croisé au labo mais je suis sûre que j'aurais adoré travailler avec toi ; tu as été d'un grand soutien à distance et en congrès, merci pour ton aide et pour ta motivation contagieuse !

Merci à mes collègues de bureau, Clara et Gérard, qui ne facilitent pas toujours mon efficacité au travail mais qui rendent les journées bien agréables. Clara, merci pour ton soutien, quelques petits coups de gueule, et aussi pour tes compliments pas toujours bien compris ! Merci Gérard pour les pauses alliant café et musique, et pour tes blagues (pas toujours de très bon goût). MERCI - je pourrais même écrire ce merci en police 50 - pour votre soutien avant le talk de NCM. Avec un style bien à vous à base de « Tu as raison d'avoir peur, en plus la salle est vraiment très grande », vous avez été d'un soutien immense, sans quoi j'aurais probablement pleuré toutes les larmes de mon corps. J'en profite pour mentionner la Dream Team de NCM, vivement le prochain congrès ensemble !

Bref, merci à Impact et même à ses locaux qui m'ont permis de vivre cette thèse avec des travaux interminables, un incendie et un « début d'inondation en salle de manip » dans ces derniers mois de thèse : cela m'a permis de tester ma résistance au stress, qui, je crois, est proche de ses limites.

Pour faire une transition entre travail et amis, un immense merci à l'(ancienne) équipe du CAMSP de BJ, Mélanie, Delphine et Nadine. Le début de ma vie professionnelle a été particulièrement agréable grâce à vous. Merci de m'avoir accompagnée et encouragée dans mes réflexions pour changer de voie. J'espère qu'on va continuer encore longtemps à se partager les cachettes (pas toujours très ingénieuses) de nos enfants !

Merci à l'équipe des 7 naines et BN pour tous ces souvenirs de nos années kiné et de nos folles aventures en Thaïlande, ou toute autre destination surprise. C'est un bonheur de vous avoir à mes côtés. Merci pour votre soutien et votre amitié ! Merci pour ces moments retrouvailles avec ou sans la bande de minis. Cécé, c'est promis, tu n'auras pas besoin de faire de sondage « Est-ce que Naf amène son PC ? » pour le prochain week-end.

Merci aux copines du ski, Mél**** et Coco ! Même si nos goûters ont un peu évolué avec les années (petite réf au combo Prince-Nutella au lac St André), vous êtes toujours mes queup' d'amour, prêtes à lancer un karaoké en toutes circonstances ! Merci d'être là depuis toutes ces années les queup', vous êtes les meilleures.

Merci aux meilleurs, les copains de la Mezcla, les copains des midis glissés, les BFF quoi ! Aulyana (la best rencontre de soirée) et Dams (le plus gentil du monde, même si tu m'as viré), merci pour tous ces moments 'potins' mais surtout pour votre soutien incroyable et votre disponibilité en cas de petite baisse d'énergie. Dadou, merci de m'avoir permis de travailler mes capacités de décodage niveau langage. «««« Guigui »»»» pour tes incompréhensions en tous genres, Chapet sinon tu risquerais d'être vexé, Bebel je ne sais pas pourquoi. Et tous les autres qui partagent plus ou moins de temps avec cette troupe. Merci aux copains de l'ancienne LMDB, Hugal, Louloute, Brice et Colombe. Merci aux meilleurs serveurs du monde : Théo, Ludi et le boss Jérèm', pour votre accueil et votre sourire (sauf le samedi midi). De l'autre côté du comptoir, vous avez finalement suivi les grandes étapes de ma vie de ces dernières années. J'espère bien pouvoir fêter la fin de cette thèse avec vous (chez vous, même !).

Merci aux copains de longue date, même si on a moins l'occasion de se voir : Vince, Duch, Max, Fab, Luce, Mim' et Schlumz.

Merci à ma famille de m'avoir permis de grandir, entourée par tout cet amour, et d'arriver aussi sereinement que possible jusque-là. Maman, papa, Benj, papi, mamie, Chris, Isa, Lala, Paulo, grand-père, grand-mère, Béné, Vio, Serge, Hervé, Thomas, Inès, Anne-Charlotte et la petite Bertille. Maman, merci de m'avoir transmis ta curiosité, ta soif d'apprendre et de transmettre, et merci pour ton amour, ta bienveillance, ton soutien et ton écoute (et encore mille autre choses) à chaque instant de ma vie. Papa, tu m'as appris l'exigence et le perfectionnisme, qui ont contribué à ce que j'arrive ici et qui continueront probablement de m'être utiles dans ma vie professionnelle. Benj, même si tu es plus loin et qu'on n'est pas les rois de la communication,

je suis heureuse de t'avoir comme frère. Papi, merci pour tous tes jeux et astuces de maths pendant mon enfance, je suis sûre que ceci a contribué à mon enthousiasme pour les apprentissages. Douces pensées pour mamie et grand-père, j'aurais aimé pouvoir partager ces moments et tellement d'autres encore avec vous.

Merci à la belle-famille : Marie et Dédé, merci pour votre accueil dans votre famille ; Juju et Nico, Guigui et Claire, Charlotte et Laurent, Hugues et Alex, et toute la marmaille : Léo, Tom Titi, Gaspard, Jules, Léo, Thomas, Roxanne, Martin, Loua, Agathe, Noé et Ariane. Je suis heureuse de faire partie de cette grande famille, et particulièrement de la team des « pièces rapportées ».

« Qu'est-ce que j'irais faire au paradis, quand tu t'endors près de moi. Qu'ils le donnent à d'autres le paradis, je n'en voudrais pas » Au début de cette thèse, je n'avais pas tellement envisagé de citer Orelsan dans ces remerciements, mais preuve que tout évolue. Et particulièrement grâce à toi, mon Greg. Merci de m'avoir soutenue dans tous mes projets, et d'en envisager tellement d'autres ensemble. Ces années de thèse, parsemées de quelques 'événements marquants', ont été intenses émotionnellement ; tu as été absolument parfait et d'un soutien incroyable dans tous ces moments. Je ne crois pas me tromper en disant qu'on forme une bonne équipe. Ces mots ne suffiront jamais à exprimer tout ce que tu m'apportes depuis ces (nombreuses maintenant) années. Je m'arrête donc ici, je vois déjà la larme qui coule.

Pour terminer ces remerciements, quelques mots insignifiants par rapport à tout le bonheur que tu as amené dans ma vie, petit Augustin d'amour. Merci d'être ce petit être plein de malice, de curiosité, de joie de vivre et d'énergie ! Je crois que je n'ai pas fini de m'émerveiller devant toi. Ni de courir (et trembler) derrière ta draisienne ou ta trottinette-skate.

*Évidemment quand t'es maman, ton cœur explose et pour toujours,
On t'confie le rôle ultime, celui qui t'change viscéralement.
Tu savais pas qu'c'était possible de générer autant d'amour,
J'trouve pas d'mots assez forts, c'est tellement, tellement.*

LISTE DES ABREVIATIONS

ADC : Adult Developmental coordination disorders/Dyspraxia Checklist

APA : Ajustements Posturaux Anticipés

AVQ : Activités de la Vie Quotidienne

BOT-2 : Bruininks-Oseretsky Test of Motor Proficiency – 2nd edition

DCD : Developmental Coordination Disorder

DD : Dyslexie Développementale

DSM-5 : Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders – Fifth Edition / Traduction française : Manuel Diagnostique et Statistique des Troubles Mentaux, 5^{ème} édition

EACD : European Academy of Childhood Disability

EMG : ElectroMyoGraphie

FNM : Fuseaux NeuroMusculaires

MABC-2 : Movement Assessment Battery fo Children – 2nd Edition / Batterie d'évaluation du mouvement chez l'enfant – 2^{nde} édition

MLM : Modèle Linéaire Mixte (LMM : Linear Mixed Model)

OFC : Optimal Feedback Control / Contrôle Optimal des Feedback

PVSE : Performances Visuo-Spatiales Elementaires (EVSP : Elementary VisuoSpatial Performance)

SRTT : Serial Reaction Time Task

TDAH : Trouble Déficit de l'Attention/Hyperactivité

TDC : Trouble Développementale de la Coordination

TDLO : Trouble Développementale du Langage Oral

TND : Troubles NeuroDéveloppementaux

TOJ : Temporal Order Judgement

TSA : Trouble du Spectre Autistique

TABLE DES MATIERES

Résumé	3
Abstract	5
Productions scientifiques	7
Remerciements.....	9
Liste des abréviations.....	13
Table des matières	14
Préambule	17
Introduction	18
I. Le contrôle moteur	19
I.1. Contrôle moteur optimal : modèles internes.....	19
I.2. Importance du système perceptif dans le contrôle moteur	23
I.2.1. Vision	23
I.2.2. Proprioception	24
I.2.3. Toucher.....	28
I.3. L’oculomotricité.....	30
I.3.1. Les saccades visuelles	30
I.3.2. Les saccades somatosensorielles	31
I.4. Localisation de cibles somatosensorielles : saccade oculaire <i>versus</i> pointage manuel .	32
II. Le Trouble Développementale de la Coordination	36
II.1. Définition.....	36
II.2. Etiologie et facteurs de risque	37
II.3. Comorbidités	38
II.4. Diagnostic du TDC.....	39
II.5. Symptomatologie et retentissement sur la vie quotidienne	42
III. Modèles explicatifs du TDC.....	44
III.1. Hypothèse de déficit des modèles internes.....	44
III.2. Hypothèse de déficit d’apprentissage procédural	48
III.3. Hypothèse de déficit des fonctions exécutives	51
IV. Hypothèse de déficits perceptifs dans le TDC	53
IV.1. Vision	53
IV.2. Proprioception	55
IV.2.1. Historique chez les enfants ‘maladroits’ (‘ <i>clumsy children</i> ’).....	55
IV.2.2. Tâches de pointage manuel	56
IV.2.3. Tâches de repositionnement actif	58
IV.2.4. Tâches passives	60
IV.3. Toucher.....	62

IV.3.1.	Détection tactile.....	63
IV.3.2.	Perception tactile : dimension spatiale	63
IV.3.3.	Perception haptique	70
V.	L'oculomotricité dans le TDC.....	72
VI.	Le TDC à l'âge adulte	76
VI.1.	Symptomatologie.....	76
VI.2.	Diagnostic.....	76
VI.3.	Déficits perceptifs somatosensoriels chez l'adulte avec un TDC.....	78
VI.4.	L'oculomotricité.....	79
Problématique.....		81
Contributions expérimentales		85
	Etude 1 :.....	87
	Etude 2 :.....	115
	Etude 3 :.....	155
Discussion générale.....		184
I.	Synthèse des résultats.....	185
II.	Pointage versus saccade vers une cible somatosensorielle.....	187
III.	Capacités perceptives somatosensorielles dans le TDC	190
III.1.	Déficits proprioceptifs	190
III.1.1.	Retard ou déficit permanent ?.....	190
III.1.2.	Imprécision ou ralentissement du traitement de l'information proprioceptive ?.....	192
III.1.3.	Quel lien entre les déficits proprioceptifs et les difficultés motrices ?.....	193
III.2.	Des déficits tactiles moins évidents.....	198
III.3.	Un déficit proprioceptif non visible dans la tâche tactile	200
IV.	Déficit des modèles internes ou déficits perceptifs dans le TDC ?	202
V.	Un déficit des représentations corporelles dans le TDC ?.....	206
VI.	Des données expérimentales à la pratique clinique	208
Conclusion et perspectives		211
Références bibliographiques.....		213

PREAMBULE

La motricité revêt une importance capitale pour l'homme. Dès les premiers mois de leur vie, les bébés manifestent un désir naturel et irrésistible de bouger, explorant le monde qui les entoure à travers leurs mouvements. Cette capacité à bouger, en permettant d'interagir avec l'environnement, est un vecteur de découverte et d'apprentissage. Le développement moteur d'un enfant est épatant, tant par le nombre de compétences apprises - telles que la marche - en un temps si court, que par son lien avec des capacités comme le langage et les relations sociales. Des altérations de ce développement moteur peuvent alors avoir des répercussions larges chez les enfants. Les difficultés motrices caractérisant le Trouble Développemental de la Coordination (TDC) chez l'enfant affectent donc non seulement sa capacité à réaliser les activités de la vie quotidienne impliquant la motricité, mais également sa confiance en soi, ses relations sociales, et sa santé globale en limitant notamment la pratique d'activité physique. Certaines des difficultés motrices du TDC persistent à l'âge adulte et ont des répercussions négatives sur la qualité de vie de ces personnes. Comprendre les mécanismes sous-tendant les difficultés motrices du TDC paraît nécessaire, dans le but d'améliorer la prise en charge des patients et ainsi améliorer leur qualité de vie.

L'objectif de ce travail de thèse est donc de tenter de mieux comprendre les déficits à l'origine des difficultés motrices du TDC, en explorant les capacités perceptives somatosensorielles, nécessaires au contrôle du mouvement.

Nous commencerons par décrire le cadre théorique du contrôle moteur sur lequel se base ce travail, en précisant l'importance du système sensoriel dans le contrôle du mouvement, puis nous décrirons le TDC ainsi que les différentes hypothèses explicatives de ce trouble, dont l'hypothèse de déficits perceptifs, au cœur de ce travail. Enfin, nous aborderons l'évolution du TDC à l'âge adulte. La partie expérimentale est composée de trois études, la première, réalisée chez des adultes neurotypiques, permettant de confirmer la pertinence de nos tâches expérimentales pour investiguer les capacités proprioceptives et tactiles, et les deux études suivantes investiguant ces capacités chez des enfants et des adultes présentant un TDC.

INTRODUCTION

I. Le contrôle moteur

La première partie de ce manuscrit permet de définir le cadre théorique du contrôle moteur dans lequel s'inscrit ce travail de recherche. La thèse n'étant pas centrée sur le contrôle moteur en lui-même, cette partie sert à donner une vue d'ensemble du cadre théorique de contrôle moteur, mais n'a pas pour vocation d'en définir les détails.

I.1. Contrôle moteur optimal : modèles internes

Les modèles internes représentent l'un des concepts majeurs dans le domaine du contrôle moteur. Selon ce concept, les modèles internes sont des mécanismes neuronaux permettant de représenter notre corps et les objets de notre environnement, y compris leurs propriétés mécaniques et cinématiques, et pouvant simuler les entrées et les sorties du système moteur. Ils permettent ainsi de prédire les conséquences d'un mouvement (Kawato, 1999). Ce contrôle moteur prédictif est important pour interagir avec l'environnement : sans cet aspect prédictif, il ne serait pas possible de réaliser des mouvements rapides et précis. En effet, ces mouvements ne peuvent pas être exécutés uniquement sur un mode de contrôle en 'feedback' (sans prédiction), du fait de la lenteur des boucles de rétroaction (Kawato, 1999). En fonctionnant seulement sur un mode en 'feedback', il faudrait systématiquement attendre les retours sensoriels au cours du mouvement pour contrôler et ajuster sa trajectoire ; ceci rendrait les mouvements particulièrement lents et/ou imprécis, d'autant plus dans un environnement changeant. Les modèles internes, en offrant la possibilité d'établir des prédictions sur les conséquences de nos gestes, permettent de corriger rapidement la trajectoire du mouvement en cours.

Le contrôle moteur prédictif comprend deux types de modèles internes : le modèle *inverse* et le modèle *direct* (ou '*forward model*') (**Figure 1**) (Kawato, 1999; Wolpert et al., 1995; Wolpert et al., 1998). Le modèle inverse permet le contrôle en 'feedforward' (*i.e.* en anticipation). A partir de l'état actuel du corps et de l'environnement, et des informations concernant l'état souhaité du corps (autrement dit, le but souhaité), le modèle inverse va estimer les commandes motrices nécessaires pour atteindre ce but. Le modèle est dit 'inverse' car il se base sur les sorties (*i.e.* le but, la posture finale désirée) pour estimer l'entrée (*i.e.* la commande motrice) (Lebon et al., 2013). Ce modèle inverse est construit à travers les expériences, grâce à l'apprentissage moteur (Wolpert et al., 1998). Le modèle direct, quant à lui, permet de prédire

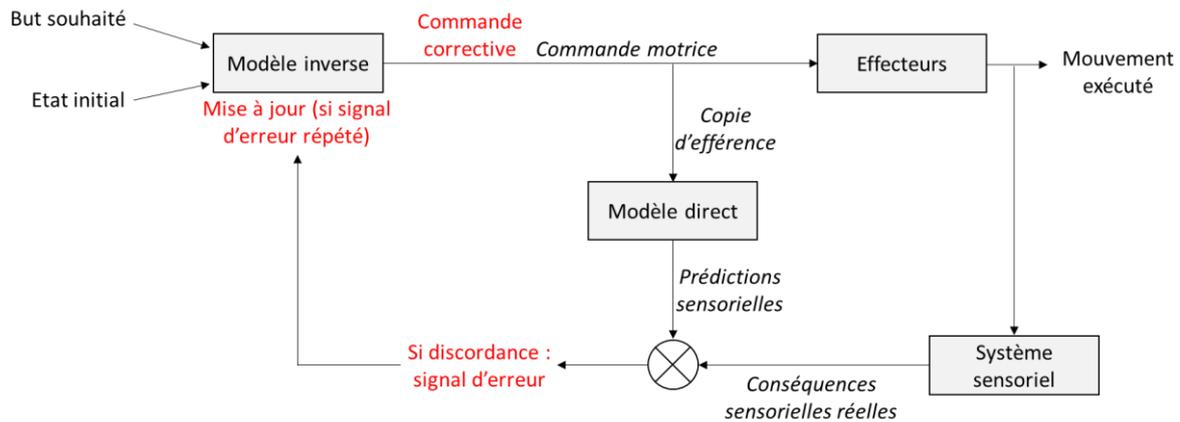


Figure 1. Illustration simplifiée du fonctionnement des modèles internes : le modèle inverse, à partir de l'état initial du corps et de l'environnement et du but souhaité, permet de calculer la commande motrice adéquate. Une copie de cette commande motrice, la copie d'efférence, est transmise en même temps au modèle direct, qui permet de fournir une prédiction des conséquences sensorielles du mouvement. Ces prédictions sont comparées aux conséquences sensorielles réelles ; en cas de discordance, un signal d'erreur permet de générer une nouvelle commande motrice pour corriger la trajectoire du mouvement en cours. Si ce signal d'erreur est répété, le modèle inverse est mis à jour.

les conséquences sensorielles du mouvement à partir de la commande motrice efférente. Lorsqu'un mouvement est programmé, une commande motrice est produite par le cortex moteur et envoyée aux effecteurs. En parallèle, une copie de cette commande, la copie d'efférence, est générée et est utilisée par le modèle direct pour prédire les conséquences sensorielles du mouvement. Ces prédictions sensorielles sont alors comparées aux retours sensoriels réels liés au mouvement. S'il y a une discordance entre les prédictions et les retours réels (en cas d'imprécision dans l'exécution des commandes motrices, de perturbation mécanique du membre ou de déplacement de la cible à atteindre par exemple), un signal d'erreur est produit, permettant d'adapter la commande motrice pour ajuster la trajectoire en temps réel ou produire un mouvement correctif. Il est décrit que ces ajustements peuvent apparaître dans les 70 à 100 millisecondes après une perturbation externe (Paulignan et al., 1991). Sans ces prédictions, un contrôle basé uniquement sur les retours sensoriels serait plus long puisque le traitement perceptif prend environ 250 millisecondes (Frith et al., 2000). Le modèle direct, en prédisant les conséquences sensorielles du mouvement, permet ainsi de corriger la trajectoire très rapidement et d'assurer une motricité précise. Ces corrections rapides peuvent être mises en évidence lors de tâche de pointage avec saut de cible. Dans ce type de tâche, le participant doit exécuter un pointage vers une cible visuelle. Dans la plupart des cas, cette cible est fixe, mais lors de certains essais, la cible va être déplacée au moment de l'initiation du mouvement de

pointage (ou juste après) (Goodale et al., 1986; Péliisson et al., 1986; Prablanc et al., 1986). Le participant va devoir adapter sa trajectoire très rapidement pour atteindre la nouvelle cible.

Les modèles internes sont plastiques, ils évoluent en fonction des expériences. En effet, si un signal d'erreur est généré de manière répétée au fil des essais, les modèles internes vont s'adapter en prenant en compte cette erreur systématique. La commande motrice des mouvements ultérieurs sera alors progressivement ajustée pour parvenir à l'état désiré. Ce processus correspond à l'apprentissage moteur, dans sa composante d'adaptation motrice. Cette adaptation peut être mise en évidence lors de tâches de pointage avec perturbation mécanique du bras (par un champ de force vitesse-dépendante par exemple). La perturbation va générer une déviation de la trajectoire, ce qui amène à des erreurs de pointage importantes lors des premiers mouvements. Pour corriger ces erreurs, la commande motrice va progressivement inclure une composante s'opposant à la perturbation, permettant de rejoindre la cible ou *a minima* de réduire l'erreur de pointage (cf. paragraphe précédent : ceci correspond à une correction rapide, grâce au modèle direct). Au fil des essais, le participant va s'adapter à cette perturbation, et la trajectoire va devenir à nouveau plus rectiligne pour atteindre la cible, malgré la perturbation mécanique du bras. Le modèle inverse a alors été mis à jour, et la commande motrice générée après cette mise à jour permet d'atteindre la cible de manière directe, en anticipant la perturbation du bras. Dès lors que la perturbation mécanique est supprimée, des erreurs de trajectoire dirigées du côté opposé apparaissent (appelées effets consécutifs), jusqu'à ce que le modèle inverse s'adapte à nouveau aux contraintes environnementales (Lebon et al., 2013).

Ce fonctionnement décrit dans le concept des modèles internes, et notamment le modèle direct, en imposant une comparaison constante entre les prédictions sensorielles et les retours sensoriels réels au cours d'un mouvement, génère un coût important pour contrôler les mouvements. Le contrôle de ces retours sensoriels apparaît donc primordial pour diminuer le coût, et pouvoir agir, dans certains cas, dans un mode en 'feedforward' (*i.e.* uniquement sur la base du modèle inverse). Par exemple, lors de certains mouvements simples et surentraînés de la vie quotidienne, comme attraper un objet sur une table dans un environnement relativement stable, l'intérêt de prendre en compte les retours sensoriels à chaque instant du mouvement pour en contrôler sa trajectoire n'apparaît pas nécessaire puisqu'il n'y a aucune raison de subir une perturbation ; dans ce cas, le modèle inverse est suffisamment fiable. Cette réflexion a amené à un nouveau modèle théorique, évolution du modèle présenté précédemment : le Contrôle Optimal des Feedback (Optimal Feedback Control ou OFC, **Figure 2**) (Shadmehr & Krakauer,

2008). Selon cette théorie, l'équivalent du modèle inverse est schématisé par une règle de contrôle des Feedback ('Feedback Control Policy'), qui a pour rôle d'établir le coût de l'action comparativement à ses bénéfices (récompenses) et de décider le poids à attribuer aux retours sensoriels. Dans le cas de mouvements simples, le poids attribué est faible, ce qui permet de diminuer le coût nécessaire pour contrôler le mouvement ; on agit alors en 'feedforward'.

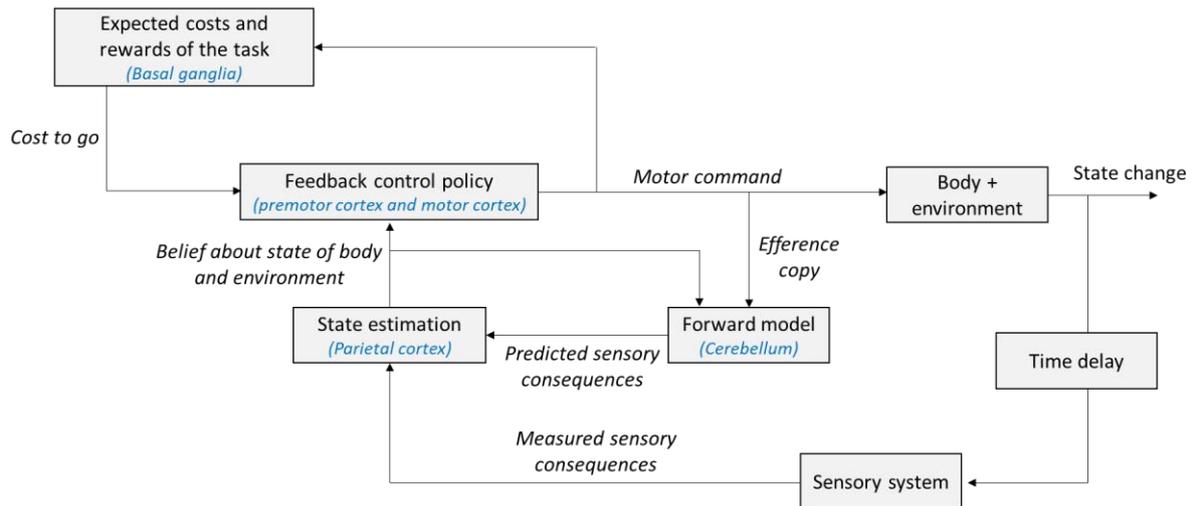


Figure 2. Illustration du Contrôle Optimal en Feedback ('Optimal feedback control'), adaptée de Shadmehr et Krakauer (2008).

Dans cette théorie, bien que le poids des retours sensoriels puisse être ajusté, le système sensoriel reste intimement lié au contrôle moteur. D'une part, l'estimation de l'état initial du système, nécessaire avant une action, est possible grâce aux informations sensorielles provenant principalement de la vision, de la proprioception et du toucher. Il a été suggéré que l'estimation de l'état du corps serait équivalent au schéma corporel, terme utilisé dans le domaine de la neuropsychologie. Cette représentation corporelle pour l'action se nourrit principalement des informations proprioceptives et tactiles (Cardinali, Brozzoli, et al., 2009; Cardinali et al., 2016; Martel, Cardinali, et al., 2019). D'autre part, lorsqu'un geste nécessite d'être contrôlé tout au long de son exécution, les retours sensoriels sont encore une fois nécessaires pour être comparés aux prédictions sensorielles, et ainsi modifier la trajectoire du mouvement en cours en cas de discordance. Enfin, la précision de ces prédictions sensorielles repose sur une calibration constante du modèle direct par l'apprentissage moteur, qui lui-même dépend des retours sensoriels : lorsqu'au cours de la réalisation de mouvements successifs, les conséquences sensorielles divergent systématiquement des prédictions sensorielles, les modèles direct et inverse sont adaptés pour générer des prédictions plus fidèles et des commandes motrices plus

précises, respectivement. Nous aborderons dans le sous-chapitre suivant le rôle des différentes modalités sensorielles - vision, proprioception et toucher - dans le contrôle moteur.

I.2. Importance du système perceptif dans le contrôle moteur

I.2.1. Vision

La plupart de nos gestes, dont ceux des membres supérieurs, sont dirigées vers une cible visuelle. Prenons un exemple de la vie quotidienne : pour se brosser les dents, nous allons d'abord attraper la brosse à dents qui se situe à côté du lavabo. Sa position a été repérée visuellement, tout comme celle du lavabo, pour éviter de s'y cogner la main. Le dentifrice est également une cible visuelle à saisir, tout comme le robinet du lavabo. Sur une tâche si banale, la vision est utile de nombreuses fois. Ainsi, le rôle de cette modalité sensorielle paraît évident dans le contrôle de nos mouvements. Ce rôle a été largement investigué dans la littérature. Cette thèse ne portant pas sur la vision, nous allons évoquer de façon succincte l'importance dans le contrôle moteur de la vision de la cible et de la vision du membre qui effectue le mouvement.

La présence des informations visuelles concernant la cible joue en effet sur la précision du point final d'un pointage du membre supérieur : la vision de la cible durant le mouvement de pointage permet d'améliorer la précision¹ (*i.e.* le biais), par rapport à une situation où la cible disparaît juste avant le début du mouvement, et ce, que le membre en mouvement soit lui-même visible ou non (Prablanc et al., 1979a; Prablanc et al., 1986).

Les informations visuelles du membre effecteur jouent également un rôle dans la précision du pointage. En investiguant la précision d'un pointage à travers différentes conditions de vision (de la cible et du membre qui effectue le pointage), Prablanc et collaborateurs ont montré que les informations visuelles qui influençaient le plus la précision du pointage étaient celles du membre pendant le mouvement : en effet, effectuer le pointage en 'boucle fermée' (*i.e.* avec des afférences visuelles du membre en mouvement) menait à des pointages plus précis (en termes de biais) que des mouvements effectués en 'boucle ouverte' (*i.e.* sans vision du membre supérieur) (Prablanc et al., 1979a). Ainsi, la présence des afférences visuelles du membre

¹ La langue anglaise offre la possibilité de distinguer '*accuracy*' et '*precision*'. Le terme '*accuracy*' fait référence à l'erreur constante, l'erreur moyenne, aussi appelé le biais ; dans des tâches de pointage de cible par exemple, l'erreur d'*accuracy* correspond à la distance entre la cible et le pointage. La '*precision*' se réfère à l'erreur variable, autrement dit à la variabilité des réponses chez un même individu. La langue française ne différencie pas aussi aisément ces deux aspects, qui sont tous les deux regroupés dans le terme 'précision'. Dans la suite du manuscrit, nous préciserons donc systématiquement auquel de ces aspects renvoie le terme 'précision'.

effecteur tout au long du mouvement garantit une précision importante du point final de pointage. De plus, l'accès aux informations visuelles du membre effecteur seulement avant le début de mouvement permet de maintenir un certain niveau de précision (même s'il est diminué par rapport à un accès tout au long du mouvement), par rapport à une absence totale d'informations visuelles du membre avant et pendant le mouvement (Prablanc et al., 1979b). Les informations visuelles contribuent donc au contrôle de la position de la main par rapport à la cible pendant le mouvement, mais elles permettent également d'estimer l'état initial (du membre et de l'environnement), avant le mouvement.

D'autres études ont montré le rôle de la vision dans l'adaptation motrice, lors de mouvements de pointage avec perturbation mécanique du membre effecteur au cours du mouvement. Bourdin et al. (2006) montrent en effet que l'estimation de la position initiale (*i.e.* avant le mouvement) de la main par le biais des afférences visuelles est nécessaire pour permettre l'adaptation motrice à une perturbation mécanique par un champ de force. En plus de la nécessité des informations visuelles, Sarlegna et al. (2010) ajoutent qu'elles sont suffisantes pour permettre une adaptation motrice suite à une perturbation par le biais d'une force de Coriolis : en effet, l'adaptation motrice est possible chez un patient désafférenté (*i.e.* privé d'informations proprioceptives) lorsque la vision est disponible. Cependant, cette nécessité est présente seulement dans le cas de certaines perturbations : ces informations visuelles sont indispensables pour s'adapter à un champ de force induisant une force de Coriolis mais pas à une force centrifuge (Bourdin et al., 2006), ni à des perturbations mécaniques moins complexes (Franklin et al., 2007; Scheidt et al., 2005; Tong et al., 2002).

I.2.2. Proprioception

Nous avons vu précédemment que la vision joue un rôle essentiel dans le contrôle de nos mouvements. Son absence peut mener à une imprécision de mouvement très variable selon la situation. Au quotidien, certains gestes sont exécutés efficacement et avec précision malgré l'absence d'informations visuelles. Par exemple, pour se coiffer, une fois la brosse à cheveux (localisée visuellement) saisie, nos mouvements ne sont pas toujours guidés par la vision. En effet, lorsque notre main est au niveau de notre tête, elle n'est plus visible ; pourtant, nos gestes restent précis. Les informations concernant l'orientation de notre main par exemple, permettant d'orienter correctement la brosse et de démêler efficacement les cheveux, proviennent au moins partiellement d'une autre modalité sensorielle : la proprioception. La contribution importante

de la proprioception dans le contrôle de nos mouvements est mise en évidence notamment en étudiant le contrôle moteur de patients désafférentés, c'est-à-dire n'ayant pas accès aux informations proprioceptives et tactiles. Après avoir défini rapidement la proprioception, nous décrirons les résultats de quelques études réalisées chez ces patients pour illustrer le rôle de ces afférences dans le contrôle de nos mouvements.

Le terme 'proprioception' a été proposé par Charles Sherrington en 1906, résultant de la contraction des mots latins 'proprius' (*i.e.* propre, qui appartient à quelqu'un) et 'perception', pour définir la capacité d'un individu à percevoir la position et le mouvement des segments corporels dans l'espace (Goble, 2010). D'autres termes, comme la 'kinesthésie', introduit initialement par Bastian dans les années 1880, peuvent être utilisés dans la littérature scientifique pour faire référence à la proprioception ; ces termes sont considérés comme interchangeables par certains chercheurs, alors que d'autres considèrent qu'ils font référence à des sous-modalités différentes (Han et al., 2016). Dans la suite de ce manuscrit, nous utiliserons le terme proprioception pour faire référence sans distinction au sens de la position et du mouvement. Le terme kinesthésie fera référence à la sous-modalité de 'sens du mouvement', tandis que la statesthésie sera définie comme le 'sens de la position'. Les récepteurs à l'origine des afférences proprioceptives sont des mécanorécepteurs contenus dans les muscles (*i.e.* les fuseaux neuromusculaires -FNM- situés dans le corps musculaire, et les organes tendineux de Golgi situés dans les tendons), les ligaments, les capsules articulaires et la peau (*i.e.* les corpuscules de Ruffini, de Pacini, de Meissner et les disques de Merkel) (Edin, 2001; Horváth et al., 2023; Matthews, 1988).

Rothwell et al. (1982) ont observé les mouvements d'un patient désafférenté, privé d'informations proprioceptives et tactiles à cause d'une neuropathie périphérique. Le patient était capable de réaliser des mouvements relativement fins des doigts et du membre supérieur, en laboratoire. En revanche, il était en grande difficulté pour réaliser des gestes dans son quotidien : attraper un stylo et écrire n'était pas possible, mettre les boutons d'une chemise ou tenir une tasse étaient des activités difficiles pour lui. Les auteurs suggéraient alors que les informations visuelles étaient indispensables pour maintenir un niveau de contraction stable pendant quelques secondes pour ce patient, ce qui n'était pas toujours possible au quotidien, et rendait ainsi les activités extrêmement difficiles. Jeannerod et al. (1984) décrivent en effet qu'en l'absence d'informations visuelles, un patient désafférenté n'était pas capable de réaliser des mouvements complexes requérant la coordination entre différentes articulations, comme les gestes de préhension. Ils confirment chez leur patient que maintenir une force constante n'est

pas possible sans vision. Seuls des mouvements simples, impliquant une seule articulation, étaient correctement exécutés par ce patient lorsque la vision était supprimée. Enfin, Miall et al. (2018) indiquent que les trois patients désafférentés inclus dans leur étude se déplacent en fauteuil roulant : même si la marche est possible pour certains d'entre eux, elle est trop coûteuse sur le plan cognitif (attentionnel) pour être fonctionnelle au quotidien. Ces difficultés massives offrent une vision globale de l'importance de la proprioception dans le contrôle de nos gestes.

A travers divers paradigmes proposés à des patients désafférentés (reproduction de pantomimes, mouvements allers-retours de tracés rectilignes, pointage avec ou sans saut de cible), il a été montré que les informations proprioceptives sont nécessaires pour permettre la coordination inter-articulaire lors de mouvements impliquant plusieurs articulations d'un même membre (Messier et al., 2003; Sainburg et al., 1993, 1995; Sarlegna et al., 2006). Par exemple, Sainburg et al. (1995) demandent aux patients privés de proprioception de réaliser des mouvements allers-retours pour tracer des lignes sur un plan horizontal. Ces mouvements requièrent une coordination entre les différentes articulations du membre supérieur : les inversions de direction de mouvement (pour faire l'aller-retour) doivent être coordonnées temporellement pour que le mouvement soit fluide et le tracé réussi. En l'absence de vision du bras et du tracé, les patients désafférentés ont montré des difficultés à synchroniser les inversions des mouvements du coude et de l'épaule, en comparaison des participants contrôles. Les auteurs ont ainsi mis en évidence le rôle de la proprioception dans la coordination inter-articulaire. L'absence d'informations proprioceptives conduit également à une imprécision des mouvements de pointage vers une cible visuelle, lorsque la vision du membre n'est pas disponible (Blouin et al., 1993; Messier et al., 2003). De manière intéressante, même en présence d'informations visuelles (du membre et de la cible) et sans aucune perturbation mécanique au cours du mouvement, un patient désafférenté montre des performances différentes des sujets contrôles lors de tâche de pointage simple de cibles visuelles, avec notamment une précision plus faible (*i.e.* un biais plus important) de la position finale du pointage ainsi qu'une trajectoire plus variable et moins rectiligne (Sarlegna et al., 2010). Les afférences proprioceptives semblent ainsi nécessaires pour assurer la précision du pointage et le contrôle de la trajectoire de mouvement, et les informations visuelles ne compensent pas totalement l'absence d'informations somatosensorielles. Concernant les mouvements uni-articulaires, moins complexes, lorsque la vision du membre n'est pas disponible, ils peuvent être programmés et produits en l'absence de proprioception, mais les informations proprioceptives sont nécessaires pour coder la position spatiale initiale du membre (Bard et al., 1995; Nougier et al., 1996). Les informations proprioceptives jouent

également un rôle dans la coordination inter-membre : Schaffer et collaborateurs (2021) ont en effet mis en évidence des déficits de coordination bilatérale dans une tâche de transport d'un objet avec les deux mains chez un patient désafférenté.

Il a également été suggéré que les afférences proprioceptives contribuent au maintien d'un comportement moteur complexe appris et automatisé tel que l'écriture : chez un patient désafférenté, l'automatisation du tracé et la forme des lettres sont perturbés, même lorsque les informations visuelles sont disponibles (Hepp-Reymond et al., 2009). Les auteurs suggèrent que le rôle de la vision est secondaire dans le contrôle de l'écriture, et que les informations proprioceptives sont centrales pour le stockage et la mise à jour de cette compétence.

Si le modèle de la 'désafférentation chronique' permet d'investiguer le rôle des afférences proprioceptives dans le contrôle moteur, il présente également quelques limites. Le caractère chronique de la pathologie chez les patients inclus dans ces études (par exemple, Bard et al. (1995) indiquent que les patients ont un tableau clinique stable depuis plus de 15 ans) entraîne probablement l'existence de mécanismes compensatoires. Les déficits observés juste après la désafférentation pourraient ainsi être différents de ceux observés dans les différentes études réalisées à distance de la perte des informations somatosensorielles. Ces compensations pourraient contribuer à l'hétérogénéité des résultats concernant les capacités d'adaptation motrice des patients privés de proprioception (Bernier et al., 2006; Miall et al., 2018). Miall et al. (2018) montrent en effet que, bien que les patients désafférentés aient des capacités d'adaptation motrice face à une perturbation mécanique pouvant être similaires aux sujets contrôles, leur vitesse d'adaptation et leurs capacités de rétention sont cependant perturbées, témoignant de mécanismes d'adaptation motrice au moins partiellement différents par rapport aux sujets sains. Ils suggèrent que les patients ont probablement mis en place des stratégies de compensation, intégrant les informations visuelles et vestibulaires et permettant une adaptation motrice malgré l'absence d'informations proprioceptives (Miall et al., 2018). Les résultats obtenus chez les patients désafférentés ne sont donc pas intégralement transférables au contrôle moteur typique, non pathologique. De plus, nous avons décrit ici le rôle des afférences proprioceptives tel qu'il est rapporté dans ces articles portant sur les études chez le patient désafférenté. Cependant, il est important de préciser que ces études ne permettent pas de distinguer clairement le rôle de la proprioception de celui du toucher, puisque les patients sont privés de ces deux modalités sensorielles.

Une autre manière d'étudier le rôle de la proprioception dans le contrôle moteur est de perturber ces afférences chez des sujets sains. Une étude a par exemple perturbé les afférences

proprioceptives par le biais de vibration tendineuse appliquée au niveau du poignet, lors de mouvements de pointage dont la trajectoire pouvait être également perturbée mécaniquement (Pipereit et al., 2006). Les auteurs ont observé que l'adaptation de la trajectoire du bras à une telle perturbation mécanique était présente, mais altérée lorsque les afférences proprioceptives étaient perturbées. En revanche, l'adaptation à une perturbation visuelle (*i.e.* rotation de l'image virtuelle de la trajectoire) restait relativement efficace, peu affectée par la perturbation des afférences proprioceptives.

Ainsi, la vision et la proprioception semblent complémentaires pour contrôler nos mouvements. L'absence d'une des entrées sensorielles pourrait être compensée partiellement par l'autre modalité, permettant de maintenir un certain niveau de contrôle moteur malgré une imprécision relative des mouvements.

I.2.3. Toucher

Alors que les modalités sensorielles visuelle et proprioceptive ont été (et sont toujours) relativement bien investiguées dans le contrôle moteur, le toucher a été moins étudié. Pourtant, les afférences tactiles jouent également un rôle critique dans le contrôle de nos mouvements. Reprenons nos exemples précédents : pour maintenir la brosse (à dents ou à cheveux) dans notre main, dès lors que cette main n'est plus visible les informations tactiles vont permettre de savoir si la brosse glisse entre nos doigts et ainsi d'ajuster la force nécessaire pour la stabiliser dans notre main au cours du mouvement.

Les informations tactiles, provenant des mécanorécepteurs cutanés (*i.e.* les corpuscules de Ruffini, de Pacini, de Meissner et les disques de Merkel) (Saal & Bensmaia, 2014), renseignent sur les propriétés de l'objet touché ou manipulé (Johansson, 2002; Sobinov & Bensmaia, 2021), et jouent un rôle dans le contrôle des mouvements du membre supérieur (pour une revue, voir Forgaard et al., 2021). Le toucher a notamment un rôle important dans le contrôle de la force de saisie (*i.e.* 'grip force') (Witney et al., 2004). En effet, une absence d'informations tactiles provenant des doigts, en raison d'une anesthésie (Augurelle et al., 2003; Edin et al., 1992) ou d'une pathologie ayant induit une désafférentation (Hermsdörfer et al., 2008; Nowak et al., 2004) est accompagnée d'une augmentation de la force de saisie qui assure une marge de sécurité plus importante pour maintenir un objet dans la main. Il a également été observé que les informations tactiles des doigts sont nécessaires pour maintenir un niveau constant de force

de saisie dans le temps (Augurelle et al., 2003; Edin et al., 1992) ; ainsi, la perte des afférences tactiles conduit à des chutes plus fréquentes de l'objet tenu dans la main. Enfin, chez le sujet sain, il existe un couplage entre la force de saisie d'un objet et la force de soulèvement (*i.e.* 'load force'). Lorsque la main enserrant l'objet est soumise à des mouvements oscillatoires verticaux, la force de soulèvement va varier en relation directe avec ces oscillations verticales ; on observe alors que la force de saisie va être ajustée de manière prédictive en fonction de la variation de la force de soulèvement. Dans le cas d'absence d'informations tactiles au niveau des doigts, ce couplage est altéré, suggérant que les afférences tactiles jouent un rôle dans ce contrôle prédictif de la force de saisie (Augurelle et al., 2003; Hermsdörfer et al., 2008; Nowak et al., 2004).

En plus de ce contrôle des muscles distaux du membre supérieur, il a été montré plus récemment que les informations tactiles des doigts semblent avoir un rôle dans le contrôle de la motricité proximale du membre supérieur (Hernandez-Castillo et al., 2020) : la sensation d'un objet qui glisse entre nos doigts provoque l'activation rapide (environ 67 millisecondes après) des muscles de l'épaule, afin que la main se déplace dans la direction du mouvement de l'objet dans le but de le garder en main. Lorsqu'il est demandé aux participants d'exécuter un mouvement dans la direction opposée au glissement de l'objet, la latence d'activation des muscles de l'épaule est plus importante ; les auteurs suggèrent que la réponse naturelle est celle qui induit la latence la plus faible, à savoir un mouvement de la main dans la direction du glissement de l'objet.

Les afférences tactiles ont donc un rôle essentiel dans le contrôle de la force de saisie d'un objet. Elles ont également un rôle dans le contrôle des phases d'approche d'un objet avant même tout contact. En effet, dans une tâche de préhension, Gentilucci et al. (1997) ont montré que l'anesthésie du bout des doigts affectait les paramètres cinématiques lors de la phase d'approche de l'objet : la phase d'ouverture des doigts est allongée et l'ouverture maximale des doigts est augmentée par rapport à un mouvement réalisé sans anesthésie. De plus, la trajectoire du poignet devient plus variable, particulièrement durant la phase de décélération. L'absence d'afférences tactiles perturbe donc la totalité du mouvement, et pas seulement le contrôle de la force de saisie lorsque l'objet est en contact avec la main. Ces résultats suggèrent que les informations tactiles des doigts participent au contrôle d'un mouvement d'atteinte et de préhension d'un objet.

Enfin, les informations tactiles des doigts jouent un rôle dans la précision des mouvements de pointage vers une cible proprioceptive (Rao & Gordon, 2001). Les chercheurs ont comparé la

précision de ces mouvements effectués sans vision, entre une condition avec et une condition sans indice tactile (la cible était touchée ou non). Ils ont observé une amélioration de la précision (en termes de biais) du point final du pointage lorsque les informations tactiles étaient présentes. De plus, lorsque ce mouvement de pointage était réalisé avec anesthésie des doigts, l'erreur de pointage augmentait. Ces résultats suggèrent donc que les afférences tactiles contribuent aussi à la précision d'un mouvement de pointage de la main.

I.3. L'oculomotricité

Différents types de comportements oculaires 'élémentaires' sont décrits, tels que la fixation, la poursuite ou la saccade. La fixation permet de maintenir l'alignement entre la fovea et une cible visuelle fixe. La poursuite correspond à un mouvement fluide, relativement lent (en comparaison à la vitesse des saccades), qui permet de maintenir le regard sur une cible visuelle en mouvement. Enfin, la saccade oculaire est un mouvement bref et rapide de l'œil, balistique, qui permet d'orienter le regard sur une cible, entre deux périodes successives de fixation ou de poursuite.

I.3.1. Les saccades visuelles

Si les saccades sont également retrouvées dans des comportements oculomoteurs tels que les nystagmus, nous pouvons distinguer deux principaux types de saccades oculaires par leur caractère intentionnel ou non : les saccades 'réflexes' et les saccades 'volontaires'. Les saccades 'réflexes' sont des mouvements déclenchés de manière externe par l'apparition soudaine d'une cible dans le champ visuel périphérique (Pierrot-Deseilligny et al., 1991). Les saccades 'volontaires' sont, comme leur nom l'indique, des mouvements intentionnels, déclenchés de manière interne, avec pour but de diriger l'œil vers un objet d'intérêt ; cette cible peut être toujours présente au moment de la saccade (ce qui correspond aux saccades guidées visuellement), pas encore présente (on parle alors de saccades prédictives) ou plus présente (saccades vers une cible mémorisée) (Pierrot-Deseilligny et al., 2003).

Comme la plupart des mouvements dirigés vers un but, les saccades sont le plus souvent dirigées vers une cible visuelle. Dans ce cas, l'effecteur oculaire est particulièrement précis : si la saccade principale a tendance à sous-estimer la cible, elle est suivie par une saccade secondaire, de correction, qui permet d'annuler l'erreur (Becker, 1989). La complexité

biomécanique du système oculomoteur étant réduite, le bruit lié à l'exécution des saccades est extrêmement réduit (à l'inverse des mouvements de pointage du membre supérieur, pour lesquels le bruit d'exécution motrice entraîne une variabilité du point d'arrivée) ; la variabilité du point d'arrivée de la saccade serait attribuée essentiellement à l'incertitude de la position de la cible (Van Beers, 2007). La vitesse d'exécution des saccades étant élevée, la trajectoire de la saccade, contrairement à celle d'un mouvement du bras, ne peut en général pas être corrigée en cours de mouvement lorsqu'un signal d'erreur est détecté sur la base des retours sensoriels et de la décharge corollaire (suggérée comme équivalente à la copie d'efférence pour la motricité squelettique). Dans le cas d'une perturbation, des saccades secondaires sont mises en place pour atteindre la cible.

I.3.2. Les saccades somatosensorielles

Comme évoqué précédemment, les saccades sont la plupart du temps dirigées vers une cible visuelle. Néanmoins, au quotidien, il arrive régulièrement qu'une saccade soit produite vers un stimulus auditif ou somatosensoriel. Ce sont ces saccades dites 'somatosensorielles' qui vont retenir particulièrement notre intérêt dans la suite de ce manuscrit.

Les saccades somatosensorielles sont déclenchées par un stimulus d'origine proprioceptive et/ou tactile. C'est le cas par exemple lorsqu'un insecte se pose sur notre bras : étant trop petit ou insuffisamment contrasté pour être vu en vision périphérique, ou situé sur une partie invisible de notre bras, cet insecte vers lequel nous voulons diriger le regard est alors codé par son information tactile (ou proprio-tactile puisque la position du bras doit être estimée par le biais des informations proprioceptives notamment).

Certains paramètres des saccades diffèrent selon que la cible soit de nature visuelle ou somatosensorielle. Les saccades somatosensorielles sont connues pour être moins précises (en termes de distance d'erreur *i.e.* biais) et plus variables que les saccades visuelles (Amlôt et al., 2003; Amlôt & Walker, 2006; Blanke & Grüsser, 2001; Groh & Sparks, 1996; Sullivan et al., 2004). Elles présentent également une latence plus longue, ainsi qu'un pic de vitesse moins élevé pour une réaliser la même amplitude (Groh & Sparks, 1996). Lorsque la cible est somatosensorielle, la saccade principale est plus fréquemment suivie d'une ou plusieurs saccades secondaires, qui néanmoins ne permettent pas de corriger complètement l'erreur de la saccade principale (Groh & Sparks, 1996). Ces différences de précision et de latence en fonction de la modalité sensorielle de la cible (*i.e.* somatosensorielle ou visuelle) seraient dues à

l'utilisation de différents cadres de référence pour le codage de la cible : si une cible visuelle est codée principalement dans un cadre de référence oculo-centré (Crawford et al., 2011), une cible somatosensorielle est codée initialement dans un cadre de référence centré sur le corps (Manson et al., 2019; McGuire & Sabes, 2009; Mueller & Fiehler, 2014) et pour être utilisé par le système oculomoteur, elle devra subir une transformation de coordonnées vers un cadre oculo-centré. Cette transformation de coordonnées peut induire une augmentation du biais et de la variabilité des réponses motrices (Schlicht & Schrater, 2007).

La nature des informations au sein de la modalité somatosensorielle ne semble pas avoir d'influence sur la précision de la saccade : les saccades vers une cible uniquement statesthésique présentent une précision (*i.e.* biais) et une variabilité similaires à celles des saccades vers une cible stato-tactile (Blanke & Grüsser, 2001; Goettker et al., 2020), stato-kinesthésique (Goettker et al., 2020) ou stato-tactilo-kinesthésique (Goettker et al., 2020; Voudouris et al., 2016). Seule la latence de la saccade est diminuée lorsque les informations kinesthésiques sont disponibles en plus des informations proprioceptives et tactiles (cible proprio-tactile) : la planification de la saccade semble ainsi facilitée par les informations kinesthésiques, mais le contrôle en reste inchangé (Voudouris et al., 2016)..

I.4. Localisation de cibles somatosensorielles : saccade oculaire *versus* pointage manuel

Si la comparaison entre saccades somatosensorielles et saccades visuelles est relativement bien documentée, la comparaison des effecteurs oculaire et manuel pour localiser une cible somatosensorielle est moins étudiée.

Dans une étude visant à investiguer l'influence du type d'informations somatosensorielles (*i.e.* proprioceptives, kinesthésiques et tactiles) sur la précision de la localisation d'une cible somatosensorielle, Goettker et al. (2020) ont comparé les deux effecteurs – oculaire et manuel – réalisant des mouvements isolés ou coordonnés (c'est-à-dire une réponse d'un seul effecteur ou des deux effecteurs au cours d'un même essai de localisation de la cible). Lorsque les participants réalisaient un mouvement coordonné œil-main pour localiser la cible somatosensorielle (quel que soit le type d'informations somatosensorielles disponibles), les auteurs ont observé que les erreurs des réponses oculaires étaient plus grandes que celles des réponses manuelles : les erreurs oculaires étaient de l'ordre de 5cm, alors que les erreurs de pointage manuel étaient 1 à 2 cm plus petites. De plus, les erreurs de réponse oculaire étaient

similaires au cours d'un mouvement isolé des yeux et d'un mouvement coordonné œil-main. Considérés ensemble, ces résultats suggèrent que les réponses oculaires (isolées ou coordonnées œil-main) sont moins précises en termes de biais que les réponses de l'effecteur manuel (lorsque le pointage manuel est réalisé conjointement à une saccade oculaire). Cette différence de précision entre les deux effecteurs pourrait venir de transformations de coordonnées différentes. Pour l'effecteur oculaire, comme indiqué précédemment, la représentation de la cible somatosensorielle doit subir une transformation de coordonnées entre un cadre de référence centré sur le corps vers un cadre de référence oculo-centré. Par contre, le pointage manuel ne nécessite pas de transformation complexe des coordonnées de la cible somatosensorielle (Buneo et al., 2002; McGuire & Sabes, 2009). Les transformations de coordonnées pour passer d'un référentiel à un autre induisant du bruit (*i.e.* de la variabilité) et de l'incertitude (*i.e.* augmentation du biais) (Abedi Khoozani et al., 2020; Abedi Khoozani & Blohm, 2018), elles peuvent expliquer au moins partiellement la précision plus faible d'une saccade par rapport à un pointage manuel vers une cible somatosensorielle.

Matsumiya (2022) a également comparé l'effecteur manuel et l'effecteur oculaire lors de mouvements coordonnées œil-main pour localiser des cibles somatosensorielles, dans le but d'investiguer la représentation de la main. Dans cette étude, les participants devaient indiquer, par le biais de ces deux effecteurs simultanément, la position estimée des bouts des doigts et des articulations métacarpo-phalangiennes sur la main non visible ; la représentation de la main était ensuite évaluée en calculant la distance entre les estimations de position de ces points d'intérêts. Contrairement aux résultats de Goettker et al. (2020), Matsumiya ne retrouve pas de différence entre l'effecteur oculaire et l'effecteur manuel. En effet la représentation de la main (lorsque celle-ci n'est pas visible) est similaire entre les réponses oculaires et les réponses manuelles, et dans les deux cas, sous-estime la longueur et surestime la largeur de la main. Ces résultats sont en accord avec les distorsions des représentations corporelles bien établies, qui concernent la main mais également d'autres parties du corps comme l'avant-bras, la jambe ou le visage, classiquement investiguées par le biais de l'effecteur manuel (Ingram et al., 2019; Longo et al., 2015; Longo, 2017; Longo & Haggard, 2010; Medina & Coslett, 2016a; Mora et al., 2018; Stone et al., 2018). Cependant, bien que la tâche de Matsumiya nécessite de localiser des cibles proprioceptives au niveau de la main, l'analyse ne s'intéresse ensuite qu'aux distances relatives entre les positions estimées de ces cibles, et non pas à la précision absolue de localisation des cibles. Ainsi, ces résultats et ceux de Goettker et collègues pris ensemble nous amènent à suggérer que la représentation de la forme de la main peut être similaire

lorsqu'elle est explorée avec l'effecteur oculaire ou manuel, mais que les estimations de la position absolue des différentes cibles somatosensorielles pourraient être 'décalées' spatialement, aboutissant ainsi à une différence de précision (*i.e.* de biais) entre les deux effecteurs.

Il a été suggéré que le type d'informations somatosensorielles influencerait la réponse manuelle mais pas la réponse oculaire (Goettker et al., 2020). En effet, ces auteurs observent une variabilité élevée des erreurs de pointage vers une cible somatosensorielle lorsque cette dernière est définie par les seules informations proprioceptives ; la variabilité diminue (mais pas le biais) lorsqu'une autre source d'information somatosensorielle est ajoutée, comme les informations tactiles ou kinesthésiques. En revanche, ni l'erreur moyenne (*i.e.* le biais) ni l'erreur variable oculaire ne sont influencées par le type d'informations somatosensorielles disponibles, comme décrit dans le sous-chapitre précédent (Blanke & Grüsser, 2001; Goettker et al., 2020; Voudouris et al., 2016).

La précision du pointage manuel vers une cible somatosensorielle s'améliore lorsque le pointage manuel est réalisé de manière conjointe à une saccade vers cette même cible, en comparaison d'un pointage isolé : même si la saccade ne fournit pas d'informations visuelles concernant la cible ou le mouvement de la main, elle permet d'améliorer la précision du pointage manuel (Goettker et al., 2020). Les auteurs suggèrent que dans le cas d'un mouvement coordonné œil-main, la copie d'efférence de la saccade est utilisée pour guider le mouvement de pointage, améliorant ainsi sa précision. En revanche, la précision de l'effecteur oculaire, en termes de biais, pour localiser une cible somatosensorielle ne diffère pas entre un mouvement isolé des yeux et un mouvement coordonné œil-main. Seule la variabilité de l'erreur est améliorée par le mouvement coordonné, en comparaison d'un mouvement isolé. A nouveau, les auteurs expliquent cette amélioration par l'utilisation des signaux efférents du pointage pour réduire le bruit de l'effecteur oculaire, ce qui rendrait les réponses moins variables. Ces résultats ont permis aux auteurs de suggérer qu'il existe un flux bidirectionnel d'informations efférentes entre les systèmes de pointage et de saccade.

Enfin, il semblerait que les erreurs de pointage manuel pour localiser une cible somatosensorielle au niveau du membre supérieur se fassent dans la direction proximale, c'est-à-dire vers le corps. En effet, dans une tâche de pointage vers une cible proprioceptive (le bout de l'index controlatéral), Wann & Ibrahim (1992) ont rapporté des erreurs de sous-estimation de la distance de la cible dans le plan sagittal. Goettker et al. (2020) rapportent également des erreurs proximales de pointage, lorsque la cible est proprioceptive ou proprio-tactile. De plus,

une ‘dérive’ proprioceptive (*‘proprioceptive drift’* en anglais) est observée au cours du temps, lorsque le membre cible est statique : les informations proprioceptives se dégradant au cours du temps, plus la durée d’immobilisation du membre supérieur augmente, plus l’erreur de pointage est élevée et proximale (Goettker et al., 2020; Wann & Ibrahim, 1992). La progression de cette dérive proprioceptive peut être arrêtée dès lors qu’un mouvement actif du doigt cible, de faible amplitude, est réalisé (Wann & Ibrahim, 1992). Goettker et al. (2020) confirment que la dérive des réponses de pointage n’est pas présente lorsque les informations kinesthésiques du bras cible sont disponibles (c’est-à-dire lorsque le participant réalise un mouvement actif du membre à localiser avant le pointage) : dans ce cas, les erreurs n’évoluent pas au fil des essais au sein d’un bloc, contrairement à ce qui était observé lorsque la cible était proprioceptive ou proprio-tactile. La présence des informations kinesthésiques mène à des réponses de pointage plus distales, c’est-à-dire que le pointage dépasse la cible dans le plan sagittal, alors que les erreurs étaient de plus en plus proximales lorsque les informations kinesthésiques n’étaient pas disponibles. Dans leur étude, Goettker et al. (2020) proposaient un mouvement actif du bras cible ; la contribution des afférences kinesthésiques et celle des efférences du mouvement ne peuvent donc pas être distinguées.

En conclusion, très peu d’études ont comparé la précision de saccades oculaires et de pointages manuels vers des cibles somatosensorielles à notre connaissance. L’étude de Goettker et al. suggère que le pointage manuel est plus précis que la saccade oculaire. Cependant, il serait intéressant d’investiguer cette comparaison dans une autre configuration, afin de pouvoir généraliser (ou non) ces résultats. Par exemple, le mouvement de réponse des participants se faisait dans le plan horizontal ; observe-t-on les mêmes différences de précision dans un autre plan ? Les informations kinesthésiques provenaient d’un mouvement actif du membre supérieur ; est-ce qu’un mouvement passif, n’impliquant donc pas la copie d’efférence, permettrait également d’éviter la dérive proximale proprioceptive ? Cette dérive proprioceptive est-elle également présente pour les réponses oculaires ? Seules les erreurs absolues de l’effecteur oculaire ont été décrites ; les erreurs de l’effecteur oculaire sont-elles réalisées dans la même direction que celles de l’effecteur manuel ? Enfin et surtout, cet article ne fournit pas de comparaison directe entre la précision oculaire et manuelle lorsque la saccade est exécutée de manière isolée.

II. Le Trouble Développementale de la Coordination

II.1. Définition

Le Trouble Développementale de la Coordination (TDC) correspond à des difficultés motrices se traduisant par une maladresse, une lenteur et une imprécision des gestes. Il fait partie des troubles moteurs au sein des troubles neurodéveloppementaux (TND) décrits dans le Manuel Diagnostique et Statistique des troubles mentaux – 5^{ème} édition (DSM-5) (American Psychiatric Association, 2013, 2015). Quatre critères diagnostiques sont décrits comme suit dans la version française du DSM-5 pour définir le TDC :

- A. L'acquisition et l'exécution de bonnes compétences de coordination motrice sont nettement inférieures au niveau escompté pour l'âge chronologique du sujet compte tenu des opportunités d'apprendre et d'utiliser ces compétences. Les difficultés se traduisent par de la maladresse (p. ex. laisser échapper ou heurter des objets), ainsi que de la lenteur et de l'imprécision dans la réalisation de tâches motrices (p. ex. attraper un objet, utiliser des ciseaux ou des couverts, écrire à la main, faire du vélo ou participer à des sports).
- B. Les déficiences des compétences motrices du critère A interfèrent de façon significative et persistante avec les activités de la vie quotidienne correspondant à l'âge chronologique (p. ex. les soins et l'hygiène personnels) et ont un impact sur les performances universitaires/scolaires, ou les activités préprofessionnelles et professionnelles, les loisirs et les jeux.
- C. Le début des symptômes date de la période développementale précoce.
- D. Les déficiences des compétences motrices ne sont pas mieux expliquées par un handicap intellectuel (un trouble du développement intellectuel) ou une déficience visuelle et ne sont pas imputables à une affection neurologique motrice (par exemple une infirmité motrice cérébrale, une dystrophie musculaire, une maladie dégénérative).

Souvent appelé 'dyspraxie' en pratique clinique, le terme 'Trouble Développementale de la Coordination' est apparu en 2015 avec la traduction française du DSM-5. Le terme '*Developmental Coordination Disorder*' (DCD) est utilisé depuis 1987 dans le DSM-III-R (3^{ème} édition, version révisée) et succède au terme de '*clumsy children*' (ou enfant maladroit). Il avait

d'abord été traduit par 'Trouble d'Acquisition de la Coordination' (TAC) dans la version française. La nouvelle terminologie de TDC permet ainsi de mettre en évidence l'aspect développemental du trouble, le terme 'acquisition' pouvant porter à confusion en suggérant une lésion acquise pendant l'enfance. Bien que le terme anglais ait été déterminé dès 1987, l'intérêt scientifique pour ce trouble reste relativement récent : Gomez & Sirigu (2015) indiquent en effet que le nombre de publications référencées sur Pubmed sous le terme de '*Developmental Coordination Disorder*' a triplé entre 2005 et 2015, passant ainsi de 133 références par an à 332.

Le TDC touche environ 5% des enfants d'âge scolaire (Li et al., 2024), avec une prévalence plus importante chez les garçons par rapport aux filles : le sex ratio garçons/filles est décrit entre 2 pour 1 et 7 pour 1 dans le DSM-5 (American Psychiatric Association, 2013; Blank et al., 2019) ; une méta-analyse récente confirme la représentation plus importante du TDC chez les garçons (avec une prévalence de 7%) que chez les filles (pour lesquels la prévalence du TDC est de 4%) (Li et al., 2024). La revue de Van Hoorn et collaborateurs (2021) indique que cette prévalence plus importante chez les garçons n'est présente que pour les enfants nés à terme ; chez les enfants nés prématurément, la proportion de filles présentant un TDC est équivalente à celle des garçons.

II.2. Etiologie et facteurs de risque

Bien que l'étiologie de ce trouble ne soit pas clairement établie, il semblerait que le TDC ait des causes multifactorielles, avec des facteurs de risque génétiques et environnementaux (van Hoorn et al., 2021). La prématurité est un facteur de risque bien établi : en effet, une naissance prématurée (avant 37 semaines de gestation) double le risque de TDC par rapport à une naissance à terme (van Hoorn et al., 2021). De plus, plus l'âge gestationnel à la naissance diminue, plus le risque de TDC augmente. Ainsi, un enfant né *très* prématurément (avant 32 semaines d'aménorrhées) ou avec un poids de naissance *très* faible (moins de 1500g) aurait 6 à 8 fois plus de risques de recevoir un diagnostic de TDC qu'un enfant né à terme ou avec un poids de naissance dans la norme (Edwards et al., 2011). Outre l'âge gestationnel, le faible poids de naissance augmente donc aussi le risque de présenter un TDC (Dewey et al., 2011). Comme évoqué précédemment, le sexe masculin est également un facteur de risque, chez les enfants nés à terme uniquement (la prématurité 'surpasse' ce facteur de risque de sexe, puisque le sex ratio est de 1 pour 1 chez les enfants nés prématurément). D'autres facteurs de risque

semblent également présents, avec un niveau de preuve faible à modéré. Parmi ceux-ci, nous pouvons citer l'hypofertilité parentale, la consommation maternelle de tabac pendant la grossesse, ou encore l'exposition postnatale aux corticostéroïdes (van Hoorn et al., 2021).

Enfin, bien que les recherches soient encore à un stade précoce, une contribution génétique est discutée dans l'étiologie du TDC. Il a été montré que les enfants avec un TDC présentent plus de variations génétiques (notamment des variations du nombre de copies, comme des délétions ou des duplications) que les enfants au développement typique, sur des gènes candidats déjà identifiés dans les TND (Mosca et al., 2016). Ces résultats sont donc en faveur d'une étiologie génétique commune entre les différents TND, notamment le Trouble du Spectre Autistique (TSA) et le Trouble Déficit de l'Attention/Hyperactivité (TDAH). La plupart des recherches génétiques s'étant intéressées à la présence de TND sans distinction, de futures études seront nécessaires pour préciser la contribution génétique éventuellement spécifique au TDC (You et al., 2023).

II.3. Comorbidités

La cooccurrence de TND, c'est-à-dire la présence de plusieurs troubles chez un même enfant, est très fréquente (Kaplan et al., 1998). Environ 50% des enfants avec un TDC présenteraient également un TDAH, ce qui représente une comorbidité forte entre les deux troubles (Kadesjo & Gillberg, 1999). Des troubles moteurs sont également très fréquemment retrouvés dans le TSA. Cependant, la cooccurrence du TDC et du TSA est à ce jour peu étudiée puisque la possibilité de double diagnostic n'est reconnue dans la définition du TSA que depuis la cinquième édition du DSM (American Psychiatric Association, 2013). Par ailleurs, il existe toujours un débat quant à la nature de ces difficultés motrices dans le TSA : ces déficits, au vu de leur fréquence élevée, font-ils partie du TSA en tant que spécificité (au même titre que le TSA peut se présenter avec ou sans déficience intellectuelle sans qu'elle ne fasse partie d'un autre TND) ? Ou bien les déficits moteurs sont-ils associés à un TDC, qui apparaîtrait fréquemment en tant que comorbidité du TSA ? Il est encore difficile de répondre à cette question au vu de la littérature restreinte sur le sujet, bien qu'une étude récente mette en évidence des différences entre les déficits de contrôle moteur d'une population TDC et ceux d'une population TSA en fonction des modes de contrôle (décrits dans le chapitre I., *i.e.* feedback et feedforward), alors même que les deux populations présentaient un niveau de performance motrice similaire au MABC (Martel et al., 2024).

Le TDC est également présent chez près d'un tiers des enfants présentant un Trouble Spécifique du Langage Oral (TDLO) (Flapper & Schoemaker, 2013). La comorbidité entre TDC et Dyslexie Développementale (DD) est, elle aussi, très fréquente puisqu'environ 50% des enfants ayant reçu l'un de ces deux diagnostics présentent également l'autre trouble (Nemmi et al., 2023). Enfin, des difficultés mathématiques et numériques, pouvant évoquer un trouble spécifique des apprentissages en mathématiques, sont également régulièrement retrouvés chez les enfants présentant un TDC (Gomez et al., 2015, 2017; Gomez & Huron, 2020; Pieters et al., 2012). La fréquence des comorbidités au sein des TND est donc élevée ; Kaplan et al. (1998) indiquent en effet que « *la comorbidité est la règle plutôt que l'exception* » dans les TND. Ce constat a amené des chercheurs à évoquer une hypothèse étiologique suggérant un développement cérébral atypique commun à tous les TND et à l'origine de ceux-ci (*'Atypical Brain Development hypothesis'*) (Kaplan et al., 1998).

II.4. Diagnostic du TDC

Pour établir un diagnostic de TDC, les quatre critères du DSM-V doivent être vérifiés. En général, la plainte des parents et de l'enfant, et éventuellement des professeurs des écoles, quant aux difficultés dans les AVQ oriente le patient vers des professionnels de santé. L'anamnèse et l'examen clinique permettent ainsi de confirmer l'absence d'affections neurologiques telles qu'une paralysie cérébrale ou une maladie neuromusculaire (critère D), ainsi que l'âge précoce d'apparition des difficultés (critère C). Des tests standardisés d'évaluation du quotient intellectuel (QI) peuvent être administrés en cas de doute sur les capacités intellectuelles de l'enfant ; cependant, si les performances scolaires sont celles attendues pour son âge, l'évaluation du QI n'est pas nécessaire pour le diagnostic du TDC (Blank et al., 2019).

En revanche, il est recommandé d'utiliser un test standardisé afin de confirmer la perturbation motrice par rapport aux attentes pour un enfant du même âge (critère A). Il existe de nombreux tests évaluant la fonction motrice dans la littérature, mais peu ont été validés pour le diagnostic de TDC. Deux batteries d'évaluation sont recommandées dans ce cadre (Blank et al., 2019), proposant des données normatives pour chaque tranche d'âge : le MABC-2 (Movement Assessment Battery for Children – 2nd edition) (Henderson et al., 2007) et le BOT-2 (Bruininks-Oseretsky Test of Motor Proficiency – 2nd edition) (Bruininks, 1978).

Parmi ces deux outils principaux, le MABC-2 est la batterie la plus utilisée dans les publications scientifiques (Blank et al., 2019). En effet, dans leur revue systématique et méta-analyse,

Subara-Zukic et collaborateurs (2022) rapportent que 75% des articles scientifiques inclus dans la revue utilisent le MABC-2 comme outil d'évaluation motrice. C'est aussi l'outil le plus recommandé dans le cadre de la pratique clinique (Ip et al., 2021). Le MABC-2 permet d'évaluer trois domaines de la motricité (fournissant ainsi trois sous-scores) : la dextérité manuelle, viser et attraper, et l'équilibre. Il propose également un score global, combinant les trois domaines testés. Le score (ou note standard) donne également une correspondance avec le percentile, permettant de situer les performances de l'enfant ou de l'adolescent par rapport aux performances attendues pour son âge. Si certaines études utilisent le 5^{ème} percentile comme score seuil pour indiquer la présence de difficultés motrices, le rapport de l'European Academy of Childhood Disability (EACD) a récemment conseillé de considérer le 15^{ème} percentile comme score seuil évoquant des performances faibles (Blank et al., 2019). Les revues systématiques récentes sur le TDC de Subara-Zukic et al., (2022) et Wilson et al. (2017) rapportent que respectivement 43% et 57% des articles inclus dans la revue ont fixé un score seuil d'inclusion au 15^{ème} percentile. Le MABC-2 présente l'avantage d'avoir été traduit dans 10 langues différentes, dont le français. La première édition de ce test permettait d'évaluer les enfants de 4 à 12 ans, tandis que la deuxième version propose des normes pour les enfants de 3 à 16 ans (étalonnée avec 1172 enfants britanniques pour la version originale et 626 enfants français pour la version traduite). Une revue systématique a permis de décrire les propriétés psychométriques d'outils d'évaluation de la fonction motrice globale chez l'enfant (Griffiths et al., 2018). Les fiabilités inter-évaluateur, test-retest et intra-évaluateur sont rapportées comme bonnes à excellentes. Le MABC-2 permettant de discriminer des groupes d'âge ou des populations cliniques, la validité de contenu est considérée comme bonne.

Le BOT-2 évalue quatre domaines de motricité : (i) le contrôle manuel fin, (ii) la coordination manuelle, (iii) la coordination globale, (iv) l'agilité et la force. Ce test montre également des caractéristiques psychométriques intéressantes, mais il présente également quelques désavantages : cette évaluation n'est pas traduite en français et la passation du test complet est relativement longue (40 à 60 minutes, contre 20 à 40 minutes pour le MABC-2). En revanche, il permet d'évaluer des enfants et jeunes adultes de 4 à 21 ans. La validité concurrente (ou concomitante) entre le MABC-2 et le BOT-2 est modérée à élevée, indiquant une bonne congruence des évaluations. Il est intéressant de noter que la troisième édition du MABC est disponible en version anglaise depuis l'hiver 2023 ; cette nouvelle version propose des normes de 3 à 25 ans, permettant ainsi de diagnostiquer des jeunes adultes présentant un TDC. La traduction française, accompagnée de ses normes, n'est pas encore disponible, mais il sera

intéressant d'utiliser cette batterie d'évaluation à l'avenir, si les propriétés psychométriques s'avèrent équivalentes (ou supérieures) à celles de la seconde édition.

Dans le cadre du diagnostic de TDC, le retentissement des difficultés motrices sur les activités de vie quotidienne (AVQ) doit également être évalué par un professionnel formé. Si un entretien avec le patient et son entourage permet de mettre en évidence les difficultés dans la vie quotidienne, il est recommandé de confirmer ce retentissement par un outil validé et standardisé comme un questionnaire à destination des parents ou des professeurs des écoles par exemple. Le questionnaire le plus fréquemment utilisé est le DCD-Q, validé pour les enfants de 5 à 14 ans dans sa version révisée (Wilson et al., 2000, 2009) ; une autre version, appelée Little-DCDQ, est validée pour les enfants de 3 à 4 ans (Rihtman et al., 2011). Un questionnaire est également inclut dans le MABC-2 (appelé MABC-2 Checklist), permettant d'évaluer les difficultés rencontrées par les enfants avec TDC dans différentes situations quotidiennes (à la maison, à l'école, durant une activité physique) (S. E. Henderson et al., 2007). Ce questionnaire peut être rempli par un enseignant ou par un parent. Il permet d'obtenir un score pour chaque tranche d'âge, qui peut être converti en percentile, permettant de situer l'enfant parmi la population de son âge. Même s'il est moins étudié que le DCD-Q, le questionnaire du MABC-2 présente de bonnes qualités psychométriques ; son score est corrélé au score du DCD-Q, et prédit mieux les troubles moteurs que ce dernier (Schoemaker et al., 2012). Ces deux questionnaires sont focalisés sur le niveau d'activité des individus lors de situations habituelles chez les enfants, comme les soins personnels, les jeux de balle ou des activités de récréation ou d'activité physique.

Bien que les symptômes du TDC soient souvent visibles à un âge précoce, les recommandations internationales de pratique clinique de l'EACD indiquent de ne pas établir de diagnostic de TDC avant l'âge de 5 ans, sauf en cas de déficience sévère (Blank et al., 2019). En effet, les enfants très jeunes peuvent présenter un retard dans le développement moteur, qui sera rattrapé spontanément. De plus, l'évaluation des performances motrices n'est pas toujours fiable, due à la coopération et la motivation variables de ces très jeunes enfants. Enfin, l'âge d'acquisition des compétences dans les AVQ étant très variable avant l'entrée à l'école, l'évaluation du critère B n'est pas fiable avant l'âge de 5 ans.

Ces éléments de diagnostic ont été formulés par un groupe d'experts dans les recommandations internationales de pratique clinique sur le TDC (Blank et al., 2019). Si ces critères sont particulièrement importants pour établir un diagnostic dans le cadre clinique, il est tout aussi primordial de les respecter dans le domaine de la recherche. En effet, pour pouvoir comparer les résultats des différentes études, issues de pays et laboratoires différents, les mêmes critères diagnostiques doivent être respectés, afin de s'assurer qu'il s'agit bien de populations cliniques similaires d'une étude à l'autre.

En pratique, nous constatons que certains des critères ne sont pas respectés dans le domaine de la recherche, y compris dans des études relativement récentes, rendant ainsi la généralisation des résultats difficile. Par exemple, certaines équipes ont recruté leur population uniquement sur la base d'un score au MABC-2, dans une population n'ayant à priori pas de plainte motrice spécifique, omettant ainsi le retentissement des difficultés motrices sur les AVQ. A l'inverse, d'autres études recrutent des participants dès lors qu'un diagnostic a été posé dans le domaine clinique ; or, cela ne préjuge pas toujours de leur performance au MABC-2. Dans le cadre de ce travail de thèse, nous avons pu en effet constater que parmi les nombreux enfants qui avaient reçu un diagnostic de TDC sans avoir bénéficié d'une évaluation standardisée, certains obtenaient un score dans la norme des enfants de leur âge lors de notre évaluation avec le MABC-2. Les différences de procédure de diagnostic dans le cadre clinique en fonction des pays peuvent mener à une hétérogénéité des populations identifiées comme présentant un TDC ; il est alors d'autant plus important de vérifier chaque critère diagnostique lors du recrutement des populations TDC dans le cadre de la recherche expérimentale, afin de permettre une comparaison et/ou une généralisation des résultats.

II.5. Symptomatologie et retentissement sur la vie quotidienne

Comme évoqué précédemment, le TDC correspond à une exécution maladroite, inefficace et souvent lente des mouvements de motricité fine et/ou globale (Barnhart et al., 2003; Blank et al., 2019; Subara-Zukic et al., 2022). Au quotidien, cela se traduit par exemple par des difficultés dans les soins du corps : les enfants avec un TDC montrent en effet des difficultés pour se brosser les dents, se laver les cheveux ou se coiffer. Ils sont également en difficulté pour différentes activités d'habillement, comme manipuler des boutons, une fermeture éclair ou encore faire ses lacets (Zwicker et al., 2013), ce qui rend l'habillement particulièrement lent (Summers et al., 2008). Les repas peuvent également être plus laborieux pour les enfants présentant un TDC

que pour leurs pairs : utiliser un couteau pour couper des aliments, mais également utiliser une fourchette sont en effet des difficultés fréquemment rapportées, amenant certains enfants avec un TDC à manger avec une cuillère ou avec les doigts encore à l'âge de 9 ans (Summers et al., 2008; Zwicker et al., 2013, 2018). Des difficultés scolaires sont souvent rapportées, en partie dues à une écriture lente et peu lisible - la prévalence de difficultés d'écriture chez les enfants avec un TDC étant de 84,5% (Dionne et al., 2023), et à des difficultés dans l'utilisation d'outils scolaires comme des ciseaux (van der Linde et al., 2015). En plus de ces perturbations motrices, des difficultés en mathématiques, y compris arithmétiques, sont également observées (Dionne et al., 2023).

Les activités de motricité globale sont également perturbées, avec des difficultés observées pour courir, sauter, nager, faire du vélo ou encore dans les sports collectifs et particulièrement les sports de balle (Magalhães et al., 2011). Des problèmes d'équilibre sont également observés chez une grande majorité d'enfants avec un TDC (Lust et al., 2022). Ces difficultés de motricité globale conduisent à un évitement des activités physiques et sociales (Zwicker et al., 2012). Il est également montré que la fréquence de surpoids et d'obésité dans cette population est plus importante que dans la population typique (Gambra et al., 2024). Le TDC a également un retentissement important au niveau psychologique, s'exprimant notamment par une faible estime de soi (Zwicker et al., 2013) et une fréquence élevée d'anxiété et de dépression (Draghi et al., 2020). Les personnes présentant un TDC semblent avoir en moyenne une qualité de vie plus basse que les personnes ne présentant pas de TND (Zwicker et al., 2013).

Les conséquences de ce trouble sont donc nombreuses et lourdes pour le quotidien des personnes présentant un TDC. Mieux comprendre son étiologie pour améliorer la prise en charge des patients apparaît donc primordial.

III. Modèles explicatifs du TDC

Comprendre l'étiologie du TDC est essentiel pour développer des outils d'intervention efficaces permettant d'améliorer les performances motrices des patients, et ainsi leur quotidien. L'intérêt scientifique pour investiguer les mécanismes sous-jacents de ce trouble a fortement augmenté ces dernières années : la revue systématique de Wilson et al. (2017) inclut en effet 106 articles (dont 91 études comportementales et 15 en neuro-imagerie) publiés entre 2011 et 2016, en lien avec l'étiologie du TDC, alors que celle de 1998 (Wilson & McKenzie) n'en incluait que 50 au total, publiées entre 1974 et 1996. La méta-analyse plus récente de Subara-Zukic et al. (2022) rapporte quant à elle 98 études (dont 20 en neuro-imagerie) publiées entre 2016 et 2021. Malgré cet intérêt grandissant, les mécanismes sous-jacents restent débattus. Plusieurs hypothèses explicatives ont été évoquées dans la littérature, que nous allons synthétiser ci-dessous. Certaines des hypothèses seront décrites brièvement, dans le but de donner une vision globale des travaux effectués sur le TDC.

A noter que l'hypothèse de déficits perceptifs (et notamment visuo-spatiaux), la plus ancienne dans le TDC, sera abordée dans la première partie du chapitre IV. Hypothèse de déficits perceptifs dans le TDC, et sera développée plus amplement puisqu'elle est au cœur de ce travail de thèse.

III.1. Hypothèse de déficit des modèles internes

Suggérée par Wilson et collaborateurs dans les années 2000, l'hypothèse étiologique d'un déficit de modélisation interne dans le TDC est la plus répandue dans la littérature. Les études du contrôle moteur dans le TDC sont en effet en faveur d'un déficit de contrôle moteur prédictif, en lien avec les modèles internes décrits dans le premier chapitre de cette introduction (cf. chapitre I.1 Contrôle moteur optimal : modèles internes). Divers paradigmes ont été utilisés pour aboutir à cette hypothèse (pour une revue, voir Adams et al., 2014), parmi lesquels nous pouvons citer les tâches de pointage avec saut de cible, permettant d'évaluer les ajustements rapides en ligne. Dans ce type de tâche, il est demandé de toucher une cible sur un écran ; si, dans la majorité des essais, la cible visuelle est fixe, quelques essais impliquent un saut de cible au début du mouvement de pointage (ou juste après). Le participant doit alors rapidement ajuster la trajectoire du mouvement en cours pour garantir la précision du point d'arrivée du pointage. Ces corrections rapides sont possibles grâce au modèle interne direct (issu de la copie

d'efférence) qui va permettre une comparaison des prédictions sensorielles et des retours sensoriels réels (cf. chapitre I.1. Contrôle moteur optimal : modèles internes) ; en cas de saut de cible, l'incongruence entre les prédictions et les retours réels constitue un signal d'erreur qui permet d'ajuster la commande motrice pour modifier la trajectoire du mouvement en cours. Des déficits de corrections rapides de mouvement ont été mis en évidence chez les enfants présentant un TDC, avec, lors des essais avec saut de cible, une latence plus importante pour initier la correction, des erreurs de pointage plus importantes et des temps de mouvement plus longs, en comparaison aux enfants au développement typique (Fuelscher et al., 2015; Hyde & Wilson, 2011a, 2011b). Adams et al. (2017) et Plumb et al. (2008) n'ont cependant pas retrouvé ces déficits sur des tâches similaires. Les auteurs expliquent cette divergence de résultats par le niveau de complexité de la tâche : Adams et son équipe ont proposé une tâche en 2D, et non en 3D comme dans les papiers de Hyde & Wilson. Concernant l'étude de Plumb et collaborateurs, la tâche a été simplifiée uniquement pour le groupe TDC car les enfants ne parvenaient pas à réaliser la tâche ; la comparaison entre les deux groupes est donc critiquable puisqu'ils ont été exposés à deux tâches différentes. Martel et al. (2024) ont proposé une autre tâche investiguant les capacités de correction en ligne du mouvement : les participants devaient saisir et soulever un objet, lourd ou léger, sans connaissance *a priori* du poids de cet objet. Une fois l'objet saisi, le mouvement de soulèvement devait donc être ajusté en ligne en fonction du poids de l'objet ressenti. Les enfants avec un TDC ont montré des capacités à corriger leur mouvement en ligne : en effet, les paramètres cinématiques de la phase de soulèvement différaient en fonction du poids de l'objet (lourd ou léger). Cependant, cette différence entre les deux conditions de poids était réduite par rapport à celle observée chez les enfants au développement typique. Les auteurs mettent en évidence que cette moindre différence est due au ralentissement global du mouvement chez les enfants avec TDC, permettant ainsi de leur laisser plus de temps pour ajuster leur mouvement une fois qu'ils ressentent le poids de l'objet. Ce résultat pourrait donc révéler des difficultés de contrôle en ligne chez les enfants avec un TDC, utilisant alors une stratégie de ralentissement du mouvement pour permettre d'adapter leur mouvement malgré ce déficit.

Des tâches d'imagerie motrice, et particulièrement de rotation mentale, ont également permis d'évaluer le contenu des modèles internes chez les enfants avec un TDC. Dans ces tâches, une partie du corps (*e.g.* la main) est présentée dans différentes configurations (c'est-à-dire avec un angle de rotation plus ou moins important) et le participant doit indiquer s'il s'agit de la main droite ou gauche. L'augmentation du temps de réponse lorsque l'angle de rotation de la main

augmente et lorsque la rotation est latérale (*versus* médiale) témoigne de l'utilisation de l'imagerie motrice, c'est-à-dire que le participant fait appel à la représentation de l'action pour parvenir à placer sa main dans cette configuration, pour identifier la latéralité présentée. En effet, la différence de réponses entre rotation latérale et rotation médiale permet d'identifier que les participants imaginent une rotation de leur propre main pour répondre : une rotation latérale étant plus difficile à réaliser qu'une rotation médiale, du fait des contraintes biomécaniques du bras, elle est donc plus difficile à imaginer, ce qui mène à des réponses plus lentes et à un nombre d'erreur plus important. La méta-analyse de Barhoun et al. (2019) confirme les déficits, en termes de temps de réponse et de nombre de réponses correctes, chez les enfants avec un TDC, bien qu'ils soient capables d'utiliser l'imagerie motrice (mise en évidence par une différence entre les conditions de rotation latérale et de rotation médiale).

Les paradigmes d'adaptation motrice suite à une perturbation visuelle (par des prismes ou une rotation visuelle) soulignent quant à eux les difficultés dans la mise à jour des modèles internes dans le TDC, témoignées par un taux d'adaptation moindre ou des effets consécutifs réduits chez les enfants avec un TDC en comparaison aux enfants contrôles (Brookes et al., 2007; Gómez-Moya et al., 2020; Kagerer et al., 2004, 2006). En revanche, certaines études n'ont pas pu mettre en évidence de déficit d'adaptation (Cantin et al., 2007; Lejeune et al., 2016). Nous reviendrons plus précisément sur ces études, qui font référence à l'apprentissage moteur et plus précisément à l'adaptation motrice, dans le sous-chapitre suivant.

Des déficits dans l'utilisation du modèle inverse (pour le contrôle en anticipation ou 'feedforward') ont été démontrés par des tâches de contrôle postural évaluant les Ajustements Posturaux Anticipés (APA). Par exemple, dans une tâche de délestage bimanuel ('bimanual load-lifting task'), un poids est attaché à l'avant-bras des participants et deux conditions de délestage sont réalisées : le participant soulève lui-même le poids (délestage volontaire), ou le poids est décroché de manière inattendue (délestage imposé). La cinématique du coude et l'activité électromyographique (EMG) des muscles fléchisseurs est comparée dans ces deux conditions : dans la condition volontaire, la réduction de l'activité EMG des fléchisseurs avant le début du délestage permet d'optimiser la stabilisation de l'avant-bras (le mouvement de flexion du coude au moment du délestage est alors réduit), ce qui indique l'utilisation des APA et la précision du modèle interne. Dans l'étude de Jover et al. (2010), bien que la présence d'APA soit confirmée chez les enfants avec un TDC, la stabilisation de l'avant-bras est moins efficace que chez les enfants au développement typique : le contrôle postural anticipatoire apparaît donc moins efficace chez les enfants avec un TDC. Cependant, une étude plus récente

utilisant le même paradigme a mis en évidence que seuls les enfants présentant à la fois un TDC et une dyslexie montraient des déficits de contrôle anticipatoire, les enfants avec un TDC isolé ou une dyslexie isolée montraient des APA similaires aux enfants au développement typique (Cignetti et al., 2018).

Des tâches de planification d'action avec sélection de prises ont également permis de mettre en exergue le déficit de contrôle moteur prédictif dans le TDC. Dans ce type de tâches, il est demandé aux participants de saisir un objet pour le manipuler ; le confort de la prise en fin de manipulation est évalué (Rosenbaum et al., 1990). Il est nécessaire (dans les essais critiques) d'avoir une représentation de l'action pour permettre de privilégier le confort final au détriment du confort lors de la saisie initiale de l'objet. Différents objets à manipuler ont été proposés, faisant ainsi varier le niveau de complexité : certaines tâches impliquent de saisir un cylindre tandis que d'autres présentent un marteau ou une épée (**Figure 3**). Si la tâche du cylindre ne permet pas de mettre en évidence de déficits (Adams et al., 2016; Smyth & Mason, 1997), la tâche de l'épée, plus complexe, révèle des difficultés de planification d'action chez les enfants avec un TDC : ceux-ci terminent moins souvent les essais critiques dans une position confortable en comparaison aux enfants au développement typique (Adams et al., 2016, 2017).

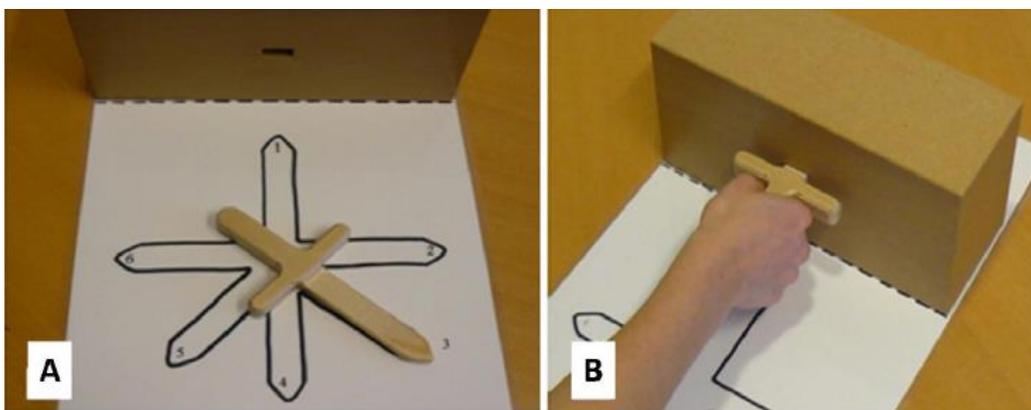


Figure 3. Issue de Adams et al. (2016). Illustration de la tâche de planification d'action de l'épée.

A. Position initiale de l'épée dans un essai critique. Les positions 2 et 3 sont décrites comme des essais critiques pour les participants droitiers, nécessitant de sacrifier le confort de la prise initiale pour permettre une position finale confortable. B. Position confortable en fin de tâche (i.e. pouce orienté vers le haut).

Les paradigmes décrits précédemment soulignent la présence d'un déficit de contrôle moteur prédictif au niveau de la motricité du membre supérieur ; ce déficit a également été investigué à travers l'effecteur oculaire, par des tâches de poursuite (Langaas et al., 1998) ou encore par des tâches de pointage oculaire vers deux cibles successives, appelées 'double step saccade

task' (Katschmarsky et al., 2001). Cette tâche, adaptée par Mays & Sparks (1980) à partir du paradigme initial de Hallett & Lightstone (1976), permet de tester la capacité à planifier des saccades sur la base de la copie d'efférence. Les participants doivent produire deux saccades oculaires successives vers des cibles visuelles mémorisées, présentées brièvement pendant la latence de la première saccade. Si la première saccade peut être programmée dans un cadre de référence rétino-topique, la programmation de la deuxième saccade nécessite un recodage dans un cadre de référence oculocentrique, en prenant en compte la copie d'efférence du premier mouvement. En effet, la deuxième cible a été codée lorsque le regard se trouvait sur le point de fixation initial, mais la saccade est réalisée depuis un point différent, à savoir la position du regard atteinte à la fin de la première saccade. Il a donc été suggéré que pour réaliser cette deuxième saccade, un adulte neurotypique devait utiliser la copie d'efférence de la première saccade pour encoder le point de départ de la deuxième saccade, et ainsi programmer sa direction et son amplitude. Les résultats de cette étude montrent une précision de la première saccade (en termes de 'biais', *i.e.* moyenne d'erreur) similaire entre les enfants avec et sans TDC, mais une précision moindre dans le groupe TDC pour la deuxième saccade, suggérant des difficultés à programmer une saccade en utilisant le contrôle moteur prédictif.

A travers des paradigmes variés, investiguant différents aspects des modèles internes (contenu, mise à jour, utilisation pour des corrections en ligne), les résultats ci-dessus semblent globalement converger vers un déficit de contrôle moteur prédictif (ou déficit de modélisation interne) dans le TDC. Il apparaît cependant que l'expression de ce déficit dépend entre autres du niveau de complexité de la tâche, de la sévérité du TDC et des troubles co-occurrents (Adams et al., 2014; Subara-Zukic et al., 2022).

III.2. Hypothèse de déficit d'apprentissage procédural

En parallèle de cette hypothèse de déficit de modélisation interne, des chercheurs ont suggéré qu'une perturbation spécifique de l'apprentissage procédural pouvait être impliquée dans le TDC (pour une revue, voir Biotteau et al., 2016). L'apprentissage procédural comprend deux processus distincts : l'adaptation motrice et l'apprentissage de séquences motrices (Doyon & Benali, 2005; Willingham, 1998). L'adaptation motrice (ou sensorimotrice) correspond à la modification des mouvements, essai après essai, dans le but de s'ajuster aux changements des afférences sensorielles et des propriétés biomécaniques de l'effecteur contrôlé (Bo et al., 2008). Elle correspond donc à la mise à jour des modèles internes, évoquée précédemment.

L'apprentissage de séquences motrices consiste à apprendre à combiner des mouvements isolés pour produire une action cohérente et fluide (Bo et al., 2008).

Adaptation motrice

L'adaptation motrice peut être investiguée par deux principales catégories de tâches : (i) les paradigmes dynamiques ou cinétiques, dans lesquels un champ de force est appliqué pendant les mouvements du membre (les afférences proprioceptives du membre en mouvement, et éventuellement visuelles si la vision est disponible, ne correspondent alors plus aux prédictions sensorielles), et (ii) les paradigmes cinématiques, dans lesquels les informations visuelles du membre en déplacement vont être perturbées soit par le port de prismes soit par une rotation visuelle informatisée (Bo et al., 2008).

A notre connaissance, aucune étude n'a investigué les capacités d'adaptation des enfants avec TDC face à une perturbation mécanique de type champ de force (*i.e.* paradigme cinétique). Les études qui ont investigué les capacités d'adaptation motrice chez les enfants avec un TDC ont donc utilisé une perturbation visuelle (*i.e.* paradigme cinématique). Brookes et al. (2007), a mis en évidence dans une tâche de lancer de balle avec port de lunettes prismatique, un taux d'adaptation plus faible chez les enfants présentant un TDC, cooccurrents ou non à une DD, par rapport aux enfants au développement typique. Gómez-Moya et al. (2020) confirment ce déficit d'adaptation motrice chez les enfants avec un TDC, s'exprimant à la fois par un taux d'adaptation plus faible mais également par des effets consécutifs moins présents. Le taux d'adaptation est décrit comme une mesure des effets directs de la modification d'un modèle interne, tandis que les effets consécutifs sont décrits comme étant le reflet du degré de consolidation des ajustements du modèle interne (Krakauer, 2009; Wang & Lei, 2015). C'est donc essentiellement la présence de ces effets consécutifs qui témoignent de l'adaptation motrice, de la mise à jour du modèle interne (et non de la création d'un nouveau modèle interne). Les enfants avec un TDC ayant des déficits visibles sur le taux d'adaptation et/ou sur les effets consécutifs, leurs capacités d'adaptation motrice semblent altérées. Avec un protocole similaire, Cantin et al. (2007) n'ont en revanche pas observé de déficit de taux d'adaptation dans leur population TDC, mais les performances de lancer avant le port de prismes étaient moins précises (en termes d'erreur moyenne) et plus variables par rapport aux enfants contrôles. Les auteurs suggèrent que le déficit d'adaptation pourrait être masqué par les performances de base déjà altérées ; le faible nombre d'enfants avec TDC inclus (n=9) pourrait également expliquer la différence de résultats avec l'étude de Gómez-Moya et al. (2020) qui ont inclus 40 enfants dans chaque groupe.

D'autres études ont investigué les capacités d'adaptation motrice dans le TDC par le biais de tâches de rotation visuomotrice. Dans ces tâches, le mouvement d'un curseur voit sa direction déviée d'un angle donné par rapport au mouvement de la main qui le contrôle (Cunningham, 1989; Kagerer et al., 1997). Par exemple, Kagerer et al. (2004) ont proposé une tâche de tracé de figures sur une tablette ; le participant ne voyait pas son tracé directement sur la tablette, mais sur un écran, après application d'une rotation de 45°. Les enfants avec un TDC ont montré un taux d'adaptation plus faible que les enfants au développement typique ; de plus, les effets consécutifs n'étaient pas présents, témoignant d'un défaut d'adaptation motrice. Kagerer et al. (2006) ont complété ces résultats en observant que les enfants avec un TDC montraient des effets consécutifs lors d'une adaptation abrupte à une distorsion visuelle plus importante (60°), mais pas lors d'une adaptation graduelle (*i.e.* avec une augmentation de la rotation de 10° tous les 21 essais). Ces résultats suggèrent que les enfants avec un TDC ont des difficultés à utiliser un signal d'erreur faible pour modifier leur modèle interne, et donc que leurs capacités d'adaptation motrice dépendent de l'ampleur de la perturbation visuomotrice. En revanche, dans une tâche dans laquelle les participants devaient cliquer sur une cible visuelle sur un écran avec une souris en mode 'inversé' (*i.e.* le curseur de la souris subissait une rotation de 180°), des enfants avec un TDC ont montré des performances d'adaptation similaires à celles des enfants au développement typique, bien qu'ils aient réalisé des mouvements plus lents (Lejeune et al., 2016). Notons que dans cette dernière étude, seul le temps pour réaliser un bloc était utilisé comme mesure de l'adaptation, la précision des réponses n'était pas étudiée. Ainsi, l'absence de différence d'adaptation entre les deux populations sur cette tâche provient peut-être simplement d'un manque de sensibilité de la mesure.

Au total, l'adaptation motrice suite à une perturbation visuelle semble perturbée chez les enfants avec un TDC, mais le déficit semble dépendre de la complexité de la tâche et de la nature de la perturbation, apparaissant particulièrement pour une perturbation visuelle légère.

Apprentissage de séquences motrices

Les capacités d'apprentissage de séquences motrices ont principalement été évaluées chez les enfants avec un TDC, par le biais de tâches appelées '*Serial Reaction Time Task*' (SRTT). Dans ce type de tâches, des stimuli apparaissent successivement dans différentes positions, et le participant doit appuyer sur les touches du clavier, le plus rapidement possible, en réponse à ces stimuli. Ceux-ci forment une séquence particulière, qui est répétée, sans que cela soit précisé au participant ; il ne pense donc pas être en situation d'apprentissage. L'apprentissage est mis en évidence notamment par la diminution des temps de réaction et du nombre d'erreur de

réponse au fur et à mesure que la séquence se répète, par comparaison aux performances qui restent stables pour des séquences aléatoires non apprises. Deux études ont montré des capacités d'apprentissage de séquences motrices préservées chez des enfants avec un TDC, en proposant des tâches de SRTT uni-manuelles (Lejeune et al., 2013; Wilson et al., 2003). Dans une tâche de SRTT bimanuelle, impliquant deux doigts de chaque main, Gheysen et al. (2011) n'ont pas observé de diminution du temps de réaction pour une séquence apprise en comparaison d'une séquence aléatoire, suggérant un déficit d'apprentissage chez les enfants avec un TDC. Cependant, ces faibles performances des enfants avec un TDC pouvaient également être liées à des difficultés de dextérité manuelle, au vu de la complexité des mouvements requis dans cette tâche. Blais et al. (2021) ont proposé une tâche de SRTT bimanuelle avec 3 types de stimuli différents : visuospatial (*i.e.* la position du stimulus indiquait le doigt qui devait appuyer sur une touche), lettre (*i.e.* la lettre présentée au centre de l'écran indiquait le doigt qui devait appuyer sur une touche), visuospatial + lettre (*i.e.* la lettre présentée dans l'une des 4 positions indiquait le doigt qui devait appuyer sur une touche). Les enfants avec un TDC (cooccurrents ou non avec une DD) ont montré des déficits d'apprentissage de séquences motrices dans les conditions de stimuli unimodaux (lettre seule ou visuospatial seul), mais ils ont pu apprendre une séquence lorsque le stimulus était une lettre dont la position indiquait également le doigt (condition visuospatiale + lettre). Enfin, une étude proposant une tâche de 'taping' des deux pouces, chacun à une fréquence particulière, a également suggéré des déficits d'apprentissage moteur chez des adolescents avec un TDC (Blais et al., 2017) : malgré une amélioration de la précision du 'taping' au fil des essais, ils ont montré une fréquence plus importante de 'taping' additionnels, qui, elle, ne diminue pas avec la pratique, révélant ainsi un déficit d'apprentissage bimanuel.

Il semble donc qu'un déficit d'apprentissage moteur soit présent chez les enfants avec un TDC lorsque les séquences impliquent des mouvements bimanuels ; en revanche, des capacités d'apprentissage de séquence sont visibles pour des mouvements uni-manuels.

III.3. Hypothèse de déficit des fonctions exécutives

Les difficultés d'organisation des gestes, mais également plus globalement des AVQ, rapportées par les personnes avec un TDC, ont suggéré des déficits des fonctions exécutives, en plus des hypothèses 'motrices' précédemment décrites. Les altérations de ces fonctions sont

évoquées ici puisqu'elles peuvent avoir une influence sur des performances tout autres en fonction des paradigmes utilisés (cf. chapitre IV. Hypothèse de déficits perceptifs dans le TDC).

Les fonctions exécutives comprennent le contrôle inhibiteur, la mémoire de travail et la flexibilité mentale ; dans certains modèles théoriques, la planification fait également partie des fonctions exécutives et sera donc évoquée dans ce sous-chapitre (voir Fogel et al., 2023 qui évoquent les différents modèles)

Dans leur revue systématique de 2013, Wilson et al. décrivaient des déficits des fonctions exécutives dans le TDC, notamment de contrôle inhibiteur et de mémoire de travail, rapportés par des articles publiés entre 1998 à 2011. Une revue systématique récente, focalisée sur les fonctions exécutives dans le TDC, précise ces déficits sur la base de 41 articles inclus (Lachambre et al., 2021). Les déficits de contrôle inhibiteur sont à nouveau rapportés, notamment concernant l'inhibition de réponses non verbales et l'inhibition attentionnelle. En revanche, les déficits d'inhibition de réponses verbales sont débattus. Concernant la mémoire de travail, les différentes études sont en faveur d'un déficit au niveau visuospatial et verbal, comme décrit par Wilson et al (2013). Des altérations des capacités de planification sont également décrites dans la revue de Lachambre et son équipe (2021). Enfin, les études concernant la flexibilité cognitive rapportent des résultats hétérogènes. Les auteurs concluent à un déficit exécutif relativement large chez les enfants présentant un TDC, mais ne statuent pas sur le lien entre ces déficits et les performances motrices. La revue de Fogel et al. (2023) permet de compléter ce dernier aspect en décrivant un lien seulement faible à modéré puisqu'une part importante de la variance des performances motrices n'est pas expliquée par les déficits des fonctions exécutives.

Même si elles sont fréquemment retrouvées chez les enfants avec un TDC, il semble donc que les altérations des fonctions exécutives ne représentent pas le déficit central du TDC mais s'ajouteraient aux déficits décrits précédemment.

IV. Hypothèse de déficits perceptifs dans le TDC

Si la méta-analyse de Wilson et al. (2013) fait apparaître le déficit de modèle interne comme dysfonctionnement principal du TDC, les déficits perceptifs, décrits depuis plus longtemps (Wilson & McKenzie, 1998), sont également évoqués comme une hypothèse alternative pouvant expliquer les symptômes du TDC. En effet, les informations perceptives sont particulièrement utiles dans le contrôle moteur, comme détaillé dans le premier chapitre de l'introduction (cf. I.2. Importance du système perceptif dans le contrôle moteur). Une imprécision de ces informations perceptives pourrait ainsi conduire à des difficultés de contrôle moteur, notamment dans la construction et la mise à jour des modèles internes.

Dans ce chapitre, nous allons décrire les données de la littérature concernant les déficits perceptifs - visuels, proprioceptifs et tactiles - dans le TDC.

IV.1. Vision

La vision étant décrite comme la modalité dominante dans le contrôle d'actions dirigées vers un but (Jeannerod, 2006), ce sens a été depuis de nombreuses années particulièrement étudié dans le TDC. Dans leur méta-analyse de 1998, Wilson & McKenzie évoquent les difficultés de traitement de l'information visuo-spatiale comme l'une des déficiences principales retrouvées dans la littérature sur le TDC. Ces difficultés sont retrouvées dans des tâches impliquant ou non des réponses motrices, et ne sont pas liées à des déficits d'acuité visuelle, de contrôle de la vergence ou d'accommodation. Les auteurs suggèrent que ces déficits visuo-spatiaux pourraient avoir des conséquences sur le contrôle du mouvement, notamment dans la détection d'erreurs et dans la correction du mouvement, mais ce lien entre perception visuo-spatiale et motricité n'a pas été clairement mis en évidence expérimentalement. Depuis la parution de cette revue de littérature, les investigations concernant les capacités visuo-spatiales se sont poursuivies, avec pour objectif notamment de clarifier la contribution de ces déficits visuels dans les troubles moteurs du TDC.

Plusieurs équipes ont confirmé les difficultés de perception visuelle, testées sans implication ou avec implication minimale de la motricité, chez les enfants présentant un TDC, avec notamment des déficits retrouvés dans des tâches de discrimination visuelle, de '*visual closure*' (i.e. une forme incomplète est présentée au participant et ce dernier doit la reconnaître), de position dans l'espace, de constance de forme ou de discrimination figure-fond (Cheng et al., 2014; Elbasan

et al., 2012; Schoemaker et al., 2001; Tsai & Wu, 2008; Van Waelvelde et al., 2004). Seules les études de Elbasan et al. (2012) et Schoemaker et al. (2001) ne trouvent pas de déficit dans les tâches de constance de forme et de discrimination figure-fond chez les enfants présentant un TDC, contrairement à Cheng et al. (2014) et Tsai & Wu (2008). Les éléments à disposition sont donc plutôt en faveur d'un déficit de perception visuo-spatiale dans cette population, y compris lorsque les tâches n'impliquent pas ou peu de motricité squelettique.

Les résultats concernant le lien entre perception visuo-spatiale et troubles moteurs dans le TDC sont quant à eux moins clairs. Schoemaker et al. (2001), Tsai & Wu (2008) et Van Waelvelde et al., (2004) ne retrouvent pas de corrélation entre les tâches de perception visuelle sans implication de la motricité, et les performances motrices évaluées par le MABC (ou MABC-2). En revanche, Van Waelvelde et al. (2004) rapportent une corrélation entre la performance dans une tâche de perception visuelle pour l'action (*i.e.* une cible bouge sur un écran et le participant doit cliquer sur la souris lorsque la cible entre dans une zone cible sur l'écran) et les performances pour attraper une balle. Tsai & Wu (2008) mettent également en évidence une corrélation entre une tâche de perception visuelle et les performances de temps de réaction à un stimulus visuel. Ces derniers auteurs suggèrent ainsi que l'association entre vision et motricité est dépendante de la tâche, et apparaît particulièrement lorsqu'il y a une composante de vitesse dans la performance motrice puisque la corrélation apparaît avec une tâche motrice de temps de réaction mais pas avec les performances au MABC. Contrairement aux deux études précédemment citées, certaines études plus récentes rapportent un lien entre les performances motrices évaluées par le MABC-2 et la perception visuo-spatiale (Cheng et al., 2014; Pisella et al., 2019) : la première retrouve une corrélation entre les capacités de discrimination visuelle et le sous-score 'Viser et attraper', tandis que la deuxième décrit une corrélation entre les performances visuospatiales élémentaires (test PVSE, Pisella et al. (2013)) et le sous-score de 'Dextérité manuelle', mais pas de corrélation avec le sous-score 'Viser et attraper'. Au vu de ces résultats hétérogènes, il est difficile de conclure de manière ferme à un lien entre la perception visuo-spatiale et les difficultés motrices du TDC.

L'hétérogénéité de ce trouble pourrait en partie expliquer ce manque de consensus. Les études s'accordent en effet à dire que tous les enfants avec un TDC ne présentent pas ces difficultés de perception visuo-spatiale. Par exemple, Schoemaker et al. (2001) décrivent que 47% des enfants avec un TDC ont des difficultés dans la tâche de 'visual closure', et environ 20% dans la tâche de position dans l'espace. L'étude de Gras et al. (2023) confirme également que certains enfants avec un TDC ne présentent pas de difficulté de perception visuo-spatiale : près de 45%

des enfants avec TDC inclus dans l'analyse montrent des capacités préservées, tandis que seulement 14,6% des enfants montrent des déficits visuo-spatiaux et la part restante (40,9%) des faiblesses visuo-spatiales. Pisella et al. (2021) rapportent une proportion similaire (42%) d'enfants avec TDC présentant des capacités visuo-spatiales préservées ; seul 8% de leur population TDC montre des déficits pathologiques de perception visuelle, alors que les 50% restant présentent des faiblesses visuo-spatiales (mises en évidence par un score compris dans le 1^{er} intervalle interquartile, mais supérieur à la limite des outliers).

En conclusion, même si des déficits de perception visuo-spatiale sont retrouvés chez des enfants présentant un TDC, leur présence n'est pas systématique et ne pourrait pas expliquer la totalité des difficultés motrices du TDC. De plus, certaines activités perturbées dans le TDC sont réalisées sans contrôle visuel, comme se laver les cheveux ou boutonner une chemise. Enfin, l'équilibre, altéré chez la plupart des enfants présentant un TDC (Lust et al., 2022), ne semble également pas corrélé aux déficits de perception visuo-spatiale (Pisella et al., 2021; Tsai & Wu, 2008). D'autres modalités sensorielles, comme la proprioception ou le toucher, pourraient alors jouer un rôle dans les difficultés motrices du TDC.

IV.2. Proprioception

IV.2.1. Historique chez les enfants 'maladroits' (*'clumsy children'*)

L'acuité proprioceptive est investiguée depuis de nombreuses années dans le TDC, en parallèle des capacités visuelles évoquées précédemment. En effet, dès 1982, Hulme et al. ont évalué la sensibilité kinesthésique chez des enfants maladroits (*'clumsy children'* en anglais) par des tâches de jugement de longueur de lignes, en manipulant les informations visuelles et proprioceptives. La longueur de ligne pouvait être explorée par le biais de la vision ou de la proprioception : les enfants pouvaient soit voir une ligne tracée pour en estimer sa longueur par les informations visuelles, soit déplacer leur doigt sur la ligne, dont les limites étaient indiquées par deux butées, pour en estimer la longueur par les informations proprioceptives. La réponse se faisait également sur la base des informations visuelles ou proprioceptives, conduisant ainsi à quatre conditions différentes (deux conditions intra-modales et deux intermodales). Les auteurs ont observé des erreurs de jugement de longueur plus importantes chez les enfants maladroits par rapport aux enfants du groupe contrôle, dans chacune des quatre conditions. En revanche, seule la condition intra-modale visuelle présentait une corrélation avec les

performances motrices. Précisant que cette tâche n'évaluait que partiellement la sensibilité kinesthésique, les auteurs ont suggéré que des tâches plus complexes seraient nécessaires pour révéler les déficits kinesthésiques des enfants maladroits. Laszlo & Bairstow (1985) ont évalué des enfants maladroits par le biais de deux tâches constituant le « Kinaesthetic Sensitivity Test – KST » (qu'ils ont développé en 1980), et ont mis en évidence des déficits proprioceptifs, tant dans la tâche de discrimination de deux positions que dans la tâche de mémoire kinesthésique. Ils évoquent alors le déficit proprioceptif comme l'une des causes principales de maladresse, sans pour autant avoir mis en évidence de corrélations entre proprioception et performance motrice. Hoare & Larkin (1991) retrouvent des déficits similaires de discrimination de position dans le KST, ainsi que dans les jugements de longueur de ligne dans la condition proprioceptive intra-modale (repérage de la longueur et réponse sur la base des informations proprioceptives). En revanche, ni Lord & Hulme (1987) ni Smyth & Mason (1998) n'ont retrouvé ce déficit proprioceptif dans les tâches du KST. En plus de la divergence de ces résultats, il est difficile de tirer des conclusions sur les capacités proprioceptives des enfants présentant un TDC sur la base de ces études : premièrement, la validité du KST a été critiquée (Doyle et al., 1986) ; deuxièmement, ces études étant relativement anciennes, les articles décrivent les enfants qualifiés de '*clumsy*' mais les critères d'inclusion (en lien avec la description du trouble à ce moment-là) ne sont pas suffisamment précis pour confirmer qu'il s'agit bien de la population TDC décrite à l'heure actuelle.

Nous allons donc nous intéresser plus particulièrement aux études plus récentes, avec des critères définissant les enfants présentant un TDC proches des critères actuels.

IV.2.2. Tâches de pointage manuel

Plusieurs études ont investigué les capacités proprioceptives des enfants présentant un TDC par le biais d'une tâche de pointage manuel vers une cible localisée *via* les informations visuelles et/ou proprioceptives. Dans cette tâche développée par von Hofsten & Rösblad (1988), la cible se situe sur la surface de la table, et le participant doit pointer la projection de cette cible sous la table (sans vision du membre qui effectue le pointage). La cible est localisée dans différentes conditions d'entrée sensorielle : (i) visuelle (*i.e.* le participant voit la cible sur la table), (ii) visuelle et proprioceptive (*i.e.* le participant voit la cible sur la table et son index controlatéral au membre qui effectue le pointage est placé sur la cible visible, cf. **Figure 4**) ou (iii) proprioceptive (*i.e.* l'index controlatéral est placé sur la cible, puis cette main n'est plus visible



Figure 4. Issue de Mon-Williams et al. (1999). Représentation de la tâche de Von Hofsten & Rösblad, dans la condition de repérage de cible visuelle-proprioceptive. Le support transparent représente la table opaque, le membre supérieur qui effectue le pointage n'est donc pas visible par le participant.

par le participant lors du pointage). Mon-Williams et al. (1999) décrivent des erreurs de pointage plus importantes chez les enfants avec TDC de 5 à 7 ans en comparaison aux enfants du groupe contrôle, et ce, quelle que soit la modalité utilisée pour repérer la position de la cible. Les enfants avec TDC semblent donc présenter des difficultés dans une tâche requérant un traitement cross-modal (repérage visuel et réponse proprioceptive), mais également dans une tâche de pointage basée sur les informations proprioceptives (sans implication de la vision). A noter que le groupe TDC n'est constitué que de huit enfants dans cette étude. Smyth & Mason (1998) ont retrouvé des déficits sur un groupe d'enfants avec TDC plus nombreux ($n=73$) de 5 à 8 ans, mais cette fois, les erreurs de pointage sont plus larges dans le groupe TDC par rapport aux enfants contrôles seulement dans les conditions proprioceptive et visuo-proprioceptive, la condition de repérage visuel n'ayant pas mis en évidence de déficit chez les enfants avec un TDC. Ces déficits étaient retrouvés chez les enfants avec TDC de 5 ans et de 7 ans, mais pas chez les enfants de 6 ans. En accord avec ces résultats, Loftesnes et al. (2017) retrouvent également des erreurs de pointage plus grandes chez les enfants avec TDC par rapport aux enfants au développement typique âgés de 11-12 ans, uniquement dans la condition de repérage proprioceptif de la cible, les erreurs dans la condition visuelle étant équivalentes dans les deux populations (la condition visuo-proprioceptive n'était pas proposée dans cette étude). Contrairement à ces résultats, Schoemaker et al. (2001) rapportent des moyennes d'erreur similaires chez les enfants avec ou sans TDC âgés de 6 à 12 ans dans les trois conditions de pointage. Ils rapportent tout de même des erreurs de pointage plus variables dans le groupe TDC par rapport au groupe contrôle, mais aucune corrélation n'est retrouvée dans le groupe TDC entre les performances proprioceptives et les performances motrices. Ces études

présentent donc des résultats divergents quant aux capacités proprioceptives des enfants avec un TDC. De plus, excepté pour la tâche de Loftesnes et al., dans la condition proprioceptive, la cible était d'abord visible pour que le participant place activement l'une des mains sur la cible ; la vision de la cible et de cette main n'était retirée que lors du pointage avec la main controlatérale. Des informations visuelles (mémorisées) quant à la position de la cible étaient donc disponibles. Les enfants avec un TDC présentant des déficits de mémoire de travail visuo-spatiales (Lachambre et al., 2021; Wilson et al., 2013), ces études n'apparaissent donc pas suffisantes pour tirer des conclusions concernant l'acuité proprioceptive dans le TDC.

IV.2.3. Tâches de repositionnement actif

Plus récemment, des chercheurs ont utilisé des tâches de repositionnement (*'matching tasks'* en anglais) pour évaluer l'acuité proprioceptive des enfants présentant un TDC. Ces tâches sont les plus classiquement utilisées dans la littérature pour évaluer la proprioception, que ce soit chez le sujet sain ou dans des populations cliniques allant du patient post-AVC au patient avec entorse de cheville (Goble, 2010). En effet, dans une revue systématique concernant l'évaluation de l'acuité proprioceptive, Horváth et al. (2023) rapportent que 836 des 1139 études incluses (soit 73%) ont utilisé ce type de tâches. Ces tâches de repositionnement actif (*i.e.* avec une réponse active) consistent à reproduire la position angulaire d'une articulation, sans recours à la vision. Elles peuvent être 'ipsilatérales', c'est-à-dire que le participant va reproduire la position avec le membre qui avait été préalablement placé en position cible ; dans ce cas, la tâche fait appel à la mémoire de travail puisque le participant doit mémoriser la position cible et la reproduire quelques secondes plus tard (proprioception *'offline'*). Ces tâches peuvent également être 'controlatérales' : le participant reproduit la position avec le membre controlatéral à celui qui a été placé en position cible. La mémoire de travail n'est alors pas impliquée, et le participant peut effectuer une comparaison concurrente des positions des deux membres (proprioception *'on line'*) ; en revanche, l'acuité proprioceptive des deux membres est requise pour réaliser cette tâche. Deux études ont testé les capacités proprioceptives des enfants présentant un TDC au niveau de l'articulation du coude par le biais de tâches de repositionnement actif ipsilatéral et controlatéral (Adams et al., 2016; Tseng, Tsai, et al., 2019). Les deux études s'accordent sur le fait que les moyennes d'erreurs (absolues ou relatives, *i.e.* prenant en compte ou non la direction de l'erreur) sont équivalentes chez les enfants avec ou sans TDC, et aucune corrélation n'est retrouvée entre ces moyennes d'erreur de repositionnement et les performances motrices évaluées par le MABC-2 (score total ou sous-

scores). Tseng, Tsai, et al. (2019) se sont également intéressés à la variabilité des réponses : ils retrouvent une variabilité plus importante chez les enfants présentant un TDC par rapport aux enfants au développement typique, ce qui témoignerait d'un déficit proprioceptif affectant la précision. Cette plus grande variabilité étant trouvée dans les deux tâches (ipsilatérale et controlatérale), les auteurs suggèrent que ce déficit ne vient pas d'une difficulté de mémoire de travail ; si tel était le cas, le déficit n'apparaîtrait que dans la tâche ipsilatérale, comme dans le cas d'une *'presbypropria'* (*i.e.* une altération de la proprioception chez le sujet âgé, affectant principalement la composante *'off line'*) (Adamo et al., 2007; Bahmad et al., 2020). Deux articles de Tseng et al. (2018) et Tseng, Tsai, et al. (2019) rapportent ces mêmes résultats au niveau du poignet : le biais (*i.e.* l'erreur moyenne) est similaire mais la variabilité de l'erreur est plus importante chez les enfants avec TDC par rapport aux enfants au développement typique. A noter que, bien que non renseigné dans les articles, la population de ces deux études semble être la même comme le révèlent les données descriptives parfaitement identiques ; ces résultats concernant un déficit proprioceptif au niveau du poignet chez les enfants présentant un TDC n'ont donc pas été répliqués à notre connaissance. Par ailleurs, Tseng et collaborateurs décrivent un lien entre l'acuité proprioceptive et les performances motrices : en effet, ils rapportent des corrélations entre la variabilité de l'erreur de repositionnement et les sous-scores du MABC-2 lorsqu'ils prennent en considération la population totale (TDC et contrôle) dans l'analyse. Plus précisément, la variabilité de l'erreur est corrélée aux performances d'équilibre (corrélation significative dans les deux articles), aux performances de dextérité manuelle dans l'article de 2019 (mais corrélations non significatives dans l'article de 2018), et aux performances de viser et attraper seulement dans l'article de 2018 (corrélations non significatives dans l'article de 2019). Cette divergence de résultats, alors même que les données sont identiques, provient du fait que la variable utilisée dans l'article de 2019 est normalisée par rapport à la position cible, dans le but de comparer les deux articulations testées (coude et poignet), alors que dans l'article de 2018, ce sont les variabilités d'erreur en degrés qui sont étudiées directement. De plus, il nous semblerait plus pertinent de normaliser les données en divisant l'erreur de chaque essai (ou la variabilité des réponses) par l'amplitude totale disponible pour chaque articulation, que comme dans l'étude de 2019, par la position cible. Ainsi, il nous paraît préférable de considérer plutôt les résultats de l'étude publiée en 2018, qui s'intéresse aux erreurs et aux variabilités de l'erreur sans transformation des données. Pour terminer, lorsque l'analyse est conduite au sein même de la population d'enfants avec un TDC (sans inclure les enfants au développement typique), aucune corrélation n'est retrouvée entre performances motrices (sous-scores du MABC-2) et performances proprioceptives (Tseng et

al., 2018, 2019). Les corrélations dans la population totale (TDC et contrôle) pouvant être dues uniquement à l'effet significatif du groupe, l'absence de corrélation au sein du groupe TDC seulement suggère de considérer avec précaution le rôle du déficit proprioceptif dans les difficultés motrices évoqué dans ces articles.

Plusieurs limites sont à noter dans ces trois études évaluant l'acuité proprioceptive des enfants avec TDC par le biais de tâches de repositionnement actif : en plus de l'utilisation d'un même jeu de données pour les deux études de Tseng et collaborateurs (2018, 2019), Adams et al. (2016) ont mesuré les réponses des participants en utilisant un goniomètre. Les auteurs indiquent que l'erreur de mesure de cet outil est comprise entre 3.39° et 4.22° . Cette erreur de mesure paraît trop importante pour mettre en évidence d'éventuelles différences entre les deux populations (TDC et contrôles). Enfin, et c'est probablement le point le plus important, ces tâches utilisent une réponse motrice du membre supérieur pour évaluer une capacité perceptive. Cette modalité de réponse est, par définition, perturbée dans le cas du TDC. Nous pouvons donc nous demander si ces variabilités d'erreur plus importantes témoignent d'un système proprioceptif moins précis, ou d'une variabilité de la réponse motrice plus importante, bien décrite dans le TDC.

Notons également qu'avec d'autres tâches impliquant la proprioception, comme des tâches de repositionnement actif impliquant le membre supérieur dans sa globalité, les études de Smyth & Mason (1998) ou Mon-Williams et al. (1999) rapportent des déficits chez les enfants avec TDC. Cependant, du fait des mesures peu précises (score entre 0 et 2 pour évaluer la performance de reproduction de position par exemple) et de l'implication de la composante motrice, nous n'allons pas détailler ces études.

IV.2.4. Tâches passives

Pour pallier ces biais méthodologiques, certaines études ont proposé des tâches passives, n'impliquant donc pas l'imprécision motrice caractérisant le TDC. Chen et al. (2020) ont proposé une tâche de repositionnement passif, réalisée à l'aide d'un dynamomètre isocinétique. Grâce à ce dispositif motorisé, le membre était placé passivement en position cible, puis ramené en position initiale ; un mouvement passif était à nouveau produit à une vitesse contrôlée et le participant devait appuyer sur un bouton pour indiquer quand il pensait avoir retrouvé la position cible ; il pouvait ensuite réaliser des ajustements de manière passive. Toute cette tâche se déroulait sans vision. Dans cette étude, Chen et son équipe ont évalué l'acuité proprioceptive

au niveau du membre inférieur dominant, plus précisément au niveau de la cheville et du genou, chez des enfants avec un TDC âgés de 9 à 12 ans, avec une tâche de repositionnement ipsilatéral seulement, faisant donc appel à la mémoire de travail. Les chercheurs retrouvent un déficit proprioceptif chez les enfants avec un TDC en comparaison des enfants au développement typique, que ce soit au niveau de la cheville ou du genou ; ce déficit est mis en évidence par des moyennes d'erreur de repositionnement ainsi que des variabilités d'erreur plus importantes dans le groupe TDC par rapport au groupe contrôle. De plus, en retrouvant une corrélation entre les moyennes et variabilités d'erreur de repositionnement et le sous-score d'équilibre du MABC-2 dans le groupe TDC, ils mettent en évidence un lien entre l'acuité proprioceptive du membre inférieur (de la cheville et du genou) et les performances d'équilibre chez les enfants avec un TDC. Ainsi, plus l'acuité proprioceptive est altérée, plus les difficultés d'équilibre sont importantes. Ce résultat complète ceux de Tseng et al. (2018) et Tseng, Tsai, et al. (2019) précédemment décrits, qui n'avaient trouvé un lien entre proprioception et équilibre que dans leur population totale (TDC et contrôle).

L'étude de Li et al. (2015) permet également de mettre en évidence un déficit proprioceptif chez les enfants présentant un TDC, en limitant les biais méthodologiques. En effet, les chercheurs ont proposé une tâche de détection de mouvement passif au niveau du membre supérieur, évaluant cette fois l'acuité kinesthésique (et non pas le sens de la position comme dans les études précédentes) : l'avant-bras était déplacé de manière passive, à vitesse constante, et les participants devaient appuyer sur un bouton dès qu'ils détectaient un mouvement. Pour limiter l'impact des différences inter-individuelles de temps de réaction, une tâche supplémentaire était proposée pour évaluer les temps de réaction à une cible visuelle, qui étaient ensuite soustraits au temps de détection du mouvement. Les enfants avec un TDC de 7 à 11 ans étaient plus lents que les enfants au développement typique pour détecter le mouvement passif de leur avant-bras ; les enfants avec TDC de 6 ans ne semblaient en revanche pas présenter de difficulté par rapport aux enfants typiques du même âge. Si ce résultat est à nouveau en faveur d'un déficit proprioceptif chez les enfants avec un TDC, il ne permet pas de mettre en lumière un lien entre ce déficit et les difficultés motrices, puisqu'aucun test de corrélation n'a été réalisé dans cette étude. De plus, il ne permet pas de distinguer une difficulté à détecter le mouvement d'un ralentissement dans le traitement de l'information proprioceptive.

Pour terminer sur les études ayant utilisé des tâches passives, Tseng et al. (2018) ont proposé, en plus des tâches de repositionnement actif, une tâche de discrimination de positions. Deux positions angulaires du poignet étaient adoptées passivement et successivement (sans vision),

et le participant devait déterminer laquelle des deux était la plus éloignée de la position de départ. Les enfants avec un TDC ont montré un seuil de discrimination plus élevé que les enfants au développement typique, c'est-à-dire qu'une différence angulaire plus importante entre les deux positions était nécessaire pour parvenir à déterminer la position la plus éloignée. Ce seuil de discrimination était corrélé aux performances de dextérité manuelle et d'équilibre (évaluées par le MABC-2) dans la population totale, mais pas dans le groupe TDC. Encore une fois, ce résultat souligne un déficit proprioceptif dans le TDC.

Enfin, Coleman et al. (2001) ont évalué des enfants âgés de 4 à 5 ans dans une tâche impliquant proprioception et vision : le bras du participant était bougé passivement, sous une table (donc sans vision), le participant devait ensuite indiquer sous quel animal (placé sur la table) sa main se trouvait. Les enfants du groupe TDC se sont avérés faire plus d'erreurs que les enfants au développement typique. Néanmoins, la tâche nécessitait également des capacités visuo-spatiales, qui peuvent être altérées dans le TDC, menant donc à un facteur confondant. De plus, du fait de leur jeune âge, les enfants étaient considérés comme 'à risque de TDC' et n'avaient donc pas de diagnostic posé de TDC.

Considérés dans leur ensemble, ces résultats suggèrent un déficit proprioceptif dans le TDC. Cependant, compte tenu des méthodologies utilisées (impliquant une réponse motrice du membre supérieur, la mémoire de travail ou le temps de réaction), l'acuité proprioceptive mérite d'être investiguée sans facteur moteur confondant, afin de mieux identifier le lien entre de possibles déficits proprioceptifs et les difficultés motrices retrouvées dans le TDC. De plus, si des déficits sont confirmés, il serait nécessaire de préciser la nature de ceux-ci : s'agit-il d'une imprécision des informations proprioceptives ou d'un ralentissement du traitement de ces afférences ?

IV.3. Toucher

Très peu d'études se sont intéressées au toucher dans le TDC, produisant ainsi une quantité très restreinte de résultats pour chacune des deux composantes de la fonction tactile: la détection (parfois nommée '*registration*' en anglais), capacité considérée comme élémentaire, et la perception, capacité plus élaborée qui comprend notamment les dimensions spatiales et temporelles (Auld et al., 2011; Cox et al., 2015).

IV.3.1. Détection tactile

Concernant les capacités élémentaires, seules deux études ont évalué le seuil de détection tactile par le biais des mono-filaments de Semmes-Weinstein chez des enfants âgés de 6 à 12 ans présentant un TDC (Cox et al., 2015; Law et al., 2011). Le mono-filament, qui permet d'imposer une force constante, est appliqué sur la surface cutanée testée, non visible par le participant, qui doit alors détecter le stimulus tactile en répondant verbalement. Dans l'étude de Cox et al. (2015), le seuil de détection tactile est mesuré au niveau de la pulpe des phalanges distales de 4 doigts (pouce, index, annulaire, auriculaire), sur chacune des mains. En revanche, Law et collaborateurs (2011) ne détaillent pas la procédure, cette mesure étant secondaire dans leur étude qui avait pour objectif principal d'évaluer le contrôle de la force de saisie (*'grip force'*). Les deux études rapportent des seuils de détection tactile similaires entre les enfants présentant un TDC et les enfants au développement typique, suggérant que les capacités élémentaires sont préservées chez les enfants avec un TDC. Cependant, il apparaît utile de confirmer ces résultats en les répliquant au vu du nombre très faible d'études.

IV.3.2. Perception tactile : dimension spatiale

a. Discrimination tactile

Les capacités plus élaborées du toucher ont également été mesurées chez des enfants avec TDC, notamment la dimension spatiale de la perception tactile dans des tâches de discrimination de deux stimuli tactiles. Cette mesure du seuil de discrimination consiste à appliquer au niveau de la zone cutanée choisie (à nouveau non visible par le participant) deux stimuli espacés d'une distance qui varie entre les essais. Le participant doit alors déterminer s'il sent une ou deux stimulations, la tâche devenant plus complexe au fur et à mesure que les deux stimuli sont plus proches. Cox et al. (2015) rapportent un seuil de discrimination tactile préservé au niveau du pouce et de l'index des enfants présentant un TDC, que ce soit pour la main dominante ou la main non dominante. Les résultats de Law et al. (2011) semblent confirmer cette absence de déficit concernant le seuil de discrimination tactile. Une seule étude rapporte quant à elle un déficit de perception de deux stimuli tactiles, chez les enfants présentant un TDC âgés de 9 à 12 ans (Elbaskan et al., 2012). Cependant, comme pour l'étude de Law et collaborateurs, l'article ne fournit pas d'éléments précis sur l'évaluation réalisée.

Lorsque la discrimination tactile est évaluée de manière dynamique (les deux stimuli tactiles sont appliqués en glissant sur la peau), le seuil de discrimination semble être plus élevé chez les enfants présentant un TDC par rapport aux enfants contrôles d'après l'article de Law et al. (2011). S'agissant, à notre connaissance, de la seule étude évaluant cette capacité, elle nécessite d'être répliquée.

b. Localisation d'un stimulus tactile

La dimension spatiale de la perception tactile a également été étudiée en évaluant les capacités de localisation d'un stimulus unique. Pour cela, les études présentées dans ce paragraphe ont utilisé différentes zones de stimulation tactile ou différentes réponses des participants.

Des études ont exploré la localisation tactile au niveau des doigts, en recueillant les réponses verbales des participants (Cox et al., 2015; Gauduel et al., 2024). Cox et collaborateurs (2015) ont proposé à des enfants avec TDC âgés de 6 à 12 ans, une tâche dans laquelle un stimulus tactile était appliqué sur l'un des 4 doigts longs, au niveau de l'une des faces (palmaire, dorsale, médiale ou latérale). Le participant devait indiquer verbalement à la fois quel doigt était touché et la face stimulée. Le nombre de bonnes réponses (*i.e.* le doigt et la face devaient être correctement indiqués) était recueilli pour chacune des mains. Les enfants présentant un TDC ont fait significativement plus d'erreurs que les enfants du groupe contrôle pour localiser le toucher au niveau de la main non dominante ; la différence entre les deux populations n'était pas significative pour la main dominante. Une analyse complémentaire a montré que le déficit de localisation tactile au niveau de la main non dominante n'était présent que chez les enfants TDC âgés de 6 à 8 ans, les performances des enfants TDC de 9 à 12 ans étant équivalentes à celles des enfants du groupe contrôle. Cox et collaborateurs ont également évalué la relation entre la perception tactile spatiale et les performances motrices. Ils ont ainsi mis en évidence un lien entre les capacités de localisation tactile de la main dominante et de la main non dominante d'une part et les performances motrices évaluées par le MABC-2 (score total et sous-score de dextérité manuelle) d'autre part : plus les performances motrices étaient élevées, meilleures étaient les capacités de localisation tactile (*i.e.* erreurs de localisation moindres), et ce pour chaque main séparément. Les capacités de localisation tactile de la main dominante étaient également corrélées aux performances d'équilibre évaluées par le MABC-2, aux performances d'écriture (lisibilité), et à la rapidité de réalisation des tâches de vie quotidienne avec la main dominante.

Une tâche similaire de localisation tactile a été utilisée par Gauduel et al. (2024), afin de tester la main non dominante (et le pied ipsilatéral) chez des enfants avec TDC âgés de 7 à 12 ans. Dans cette tâche, une stimulation tactile était appliquée au niveau d'un doigt (ou d'un orteil) et le participant devait, sans aide de la vision, indiquer le numéro du doigt stimulé (allant de 1 à 5, du pouce à l'auriculaire). Les auteurs rapportent un déficit de localisation tactile au niveau de la main et du pied chez les enfants présentant un TDC, en comparaison des enfants au développement typique. Ce déficit concerne à la fois le pourcentage d'erreurs et l'amplitude des erreurs (*i.e.* la distance entre le doigt indiqué par le participant et le doigt réellement stimulé, en nombre de doigts). Étant donné les difficultés concernant les habiletés numériques décrites dans une grande part de cette population (89,5% des enfants avec un TDC pourraient montrer des difficultés mathématiques d'après Dionne et al., 2023), il nous semble que la modalité de réponse choisie dans cette tâche pourrait constituer un facteur confondant. En effet, même en absence de déficit tactile, nommer le numéro du doigt qui a été stimulé n'est pas un exercice simple pour un enfant présentant un TDC, d'autant plus que l'information sur la correspondance entre le doigt et son numéro n'était pas disponible visuellement pour le participant au cours de la tâche. Malgré la complexité de la tâche, cette étude apporte des arguments en faveur d'un déficit de perception spatiale tactile dans le TDC.

Une dernière étude s'est intéressée aux capacités de localisation tactile au niveau des doigts, plaidant également en faveur d'un déficit chez les enfants TDC (Elbasan et al., 2012). Cependant, la modalité de réponse n'étant pas précisée (*e.g.* une réponse verbale ou un pointage avec le bras controlatéral), il est difficile d'évaluer la présence ou non de facteur confondant lié à la tâche. Par ailleurs, il n'a pas été retrouvé de corrélation entre les performances de localisation tactile et l'indépendance fonctionnelle évaluée par la WeeFIM², ce qui suggère une absence de lien entre les déficits tactiles et les performances lors des actes de la vie quotidienne comme en particulier les soins personnels (Elbasan et al., 2012). Enfin, cette même étude de Elbasan et collaborateurs (2012) semblent avoir proposé une autre tâche de localisation de stimuli tactiles appliqués sur d'autres parties du corps (pas seulement les doigts) ; ils rapportent des difficultés chez des enfants âgés de 9 à 10 ans et présentant un TDC, en comparaison à des enfants au développement typique du même âge. Cependant comme précisé précédemment, la

² La WeeFIM ('Functional Independence Measure for Children') est un outil d'évaluation standardisé pour mesurer l'indépendance fonctionnelle des enfants dans les AVQ. Elle évalue des activités fonctionnelles dans trois domaines : les soins personnels (manger, se laver le visage et les mains, se brosser les dents, s'habiller, utiliser les toilettes), la mobilité (transferts, mobilité sur surfaces planes, monter et descendre les escaliers) et les fonctions cognitives (communication, résolution de problèmes, interaction sociale). Pour chaque activité, une échelle de 1 à 7 est utilisée allant d'une assistance totale (1) à une indépendance complète (7).

procédure de chaque sous-test de la batterie utilisée dans cette étude n'est pas décrite, ni même les différentes zones du corps sur lesquelles les stimulations tactiles ont été appliquées.

En résumé, les données de la littérature évaluant la perception tactile spatiale au niveau des doigts dans le TDC sont limitées : à notre connaissance, seules les trois études rapportées ci-dessus existent. Si ces trois études mettent en évidence un déficit, Cox et al. (2015) rapportent des difficultés uniquement au niveau de la main non dominante et seulement chez les enfants de moins de 9 ans, tandis que Elbasan et al. (2012) montrent un déficit dans une population TDC de 9-10 ans. En outre, les deux études qui ont testé une corrélation entre les performances tactiles et les performances motrices divergent dans leurs conclusions, Cox et al. (2015) montrant une corrélation avec le score MABC-2, l'écriture, et les AVQ, tandis que Elbasan et al. (2012) ne retrouvent pas de corrélation entre les performances tactiles et les AVQ. Cependant, cette différence peut s'expliquer par le fait que Cox et collaborateurs ont évalué ces liens entre toucher et motricité dans leur population globale (TDC et contrôle), alors que Elbasan et collègues ont réalisé les tests de corrélation au sein de chaque groupe séparément. Le lien établi dans l'étude de Cox peut donc être dû à un effet principal du groupe dans l'évaluation des capacités tactiles, le groupe TDC présentant de moins bonnes capacités que le groupe contrôle à la fois au niveau tactile et au niveau moteur, mais sans nécessairement refléter un lien entre la sévérité du déficit tactile et la sévérité du déficit moteur. Un test de corrélation au sein de la seule population de TDC permettrait d'apporter une réponse à cette question. Dans l'étude de Elbasan et al. (2012), ce lien entre sévérité du déficit tactile et sévérité du déficit moteur n'a pas été retrouvé.

Enfin, il est important de préciser que ce type de tâche d'identification des doigts sur la base du toucher n'implique pas seulement les capacités tactiles élémentaires mais fait appel à des représentations de plus haut niveau (Rusconi et al., 2009; Tamè et al., 2017). En effet, indiquer sans l'aide de la vision quel doigt a été touché est une tâche relativement difficile même pour des adultes neurotypiques. Si toutes les études convergent vers un trouble d'identification des doigts, il nous semble difficile d'établir des conclusions fermes quant aux capacités de localisation tactile des enfants TDC à partir de ces articles.

Les capacités de localisation tactile au niveau des mains chez les enfants présentant un TDC, et plus spécifiquement leur capacité d'utiliser un référentiel externe pour localiser le toucher, ont fait l'objet d'une autre étude (Johnston et al., 2017). L'utilisation d'un tel référentiel externe a été mise en évidence chez l'adulte neurotypique par l'effet 'mains croisées' dans des tâches de

'Temporal Order Judgement' (TOJ). Dans ce type de tâche, deux stimulations tactiles séparées d'un délai très court sont appliquées au niveau des mains du participant, qui doit alors indiquer quelle main a été touchée en premier. A noter que selon les essais, les mains peuvent être en position canonique, c'est-à-dire non croisées, ou en position croisée (*i.e.* la main droite dans l'hémi-espace gauche et inversement). Cette posture 'mains croisées' crée un conflit entre la localisation du toucher dans un environnement externe et la localisation anatomique (*i.e.* sur une carte corporelle somatosensorielle), et mène à des erreurs plus nombreuses pour identifier la main qui a été touchée en premier (effet 'mains croisées'). Ce codage spatial du toucher dans un cadre de référence externe est mis en évidence, par la présence d'un effet 'mains croisées', dès l'âge de 4 ans (Begum Ali et al., 2014), avec des prémices de ce codage dès 6 mois et demi (Bremner et al., 2008). La tâche que Johnston et al. (2017) ont proposé pour examiner l'effet 'mains croisées' chez les enfants présentant un TDC est légèrement différente et développée par Begum Ali et al. (2014). Dans cette tâche, pour chaque essai, une seule stimulation tactile était appliquée sur l'une des deux mains, et l'enfant devait indiquer sur quelle main la stimulation avait été produite. Chaque vibreur était symbolisé par une peluche en forme d'animal et l'enfant devait indiquer lequel des deux animaux avait produit la vibration sur sa main, évitant ainsi une réponse verbale de la latéralité, plus complexe et entachée d'erreurs. La posture alternait entre mains décroisées et mains croisées. Les résultats de cette étude montrent un pourcentage d'erreurs plus important lorsque les mains sont croisées par rapport à une posture canonique dans les deux groupes, ce qui suggère que les enfants avec un TDC et les enfants contrôles utilisent un cadre de référence externe pour localiser le toucher. Néanmoins, les enfants présentant un TDC de 7 à 11 ans faisaient plus d'erreurs que les enfants neurotypiques du même âge, quelle que soit la posture des mains, un déficit tactile qui n'était par ailleurs pas lié aux capacités attentionnelles ni aux performances de motricité fine. De plus, les enfants du groupe TDC ont montré des performances de localisation tactile similaires à celles des enfants au développement typique plus jeunes (5-6 ans) ayant le même niveau de motricité fine. Les auteurs évoquent ainsi des capacités de localisation tactile immatures chez les enfants avec TDC. Afin de préciser cette hypothèse, les auteurs suggèrent d'investiguer ces performances chez des adultes avec TDC : les enfants avec TDC présentent-ils un retard qui sera rattrapé au cours du développement, ou ce déficit de localisation tactile perdure-t-il à l'âge adulte ? Il est également intéressant de noter que, du fait de l'absence de corrélation significative au sein du groupe TDC dans cette étude, le degré de déficit tactile ne semble pas en lien avec la sévérité des difficultés motrices du TDC.

Cette possibilité d'utiliser un cadre de référence externe pour localiser le toucher chez les enfants présentant un TDC a été confirmée par la mesure des temps de réaction en réponse à des stimuli tactiles avec deux conditions de posture des mains (croisées ou décroisées) combinées à deux conditions de compatibilité stimulus-réponse (réponse par la main du côté stimulé ou par la main controlatérale) (O'Brien et al., 2008). Les temps de réaction étaient en effet plus longs lorsque les mains étaient croisées que lorsqu'elles étaient décroisées. A nouveau, au-delà de cet effet de croisement des mains, le temps de réaction des enfants avec TDC était allongé en comparaison aux enfants neurotypiques pour les deux postures des mains et pour les deux conditions de compatibilité. Cependant, ce ralentissement général n'était présent que chez les enfants TDC âgés de 9-10 ans, le groupe TDC de 6-7 ans ayant des performances similaires aux enfants au développement typique du même âge. Les enfants TDC semblent améliorer leur temps de réaction pour répondre à un stimulus tactile au cours du développement, mais cette amélioration est moins importante que chez les enfants au développement typique, menant ainsi à une différence de performances entre les groupes TDC et contrôle uniquement chez les 9-10 ans. Les auteurs suggèrent ainsi un dysfonctionnement somatosensoriel dans le TDC, qui apparaîtrait au cours du développement puisque le traitement des informations tactiles évolue dans l'enfance. A noter que dans cette étude, les enfants TDC montraient des temps de réaction similaires aux enfants du groupe contrôle pour répondre à des stimuli auditifs, indiquant ainsi que le déficit dans la tâche tactile n'était pas lié à un ralentissement généralisé dans la population TDC.

Enfin, Nobusako et al. (2021) a investigué le biais perceptif en proposant une tâche de TOJ avec des stimuli visuels et tactiles. Dans ce type de tâche, deux stimuli, un tactile et un visuel, sont présentés avec un intervalle de temps plus ou moins important, voire absent. Lorsque les deux stimuli de modalités différentes sont présentés de manière synchrone, la réponse du participant indique le biais perceptif vers cette modalité. Dans cette étude, les enfants avec un TDC ont montré un biais perceptif vers les informations visuelles plus fort que les enfants au développement typique, puisqu'ils avaient tendance à indiquer plus fréquemment avoir perçu le stimulus visuel en premier lorsque les deux stimuli étaient présentés simultanément. Les auteurs suggèrent une plus forte dépendance aux informations visuelles chez les enfants avec un TDC. Ce résultat pourrait néanmoins suggérer un ralentissement du traitement de l'information tactile, déjà évoqué par O'Brien et al. (2008), qui mènerait les enfants avec un TDC à ressentir le stimulus visuel plus tôt que le stimulus tactile, car il serait traité plus rapidement. Par ailleurs, ce biais vers les informations visuelles était corrélé aux performances

de dextérité manuelle du MABC-2, analyse réalisée dans la population totale (TDC et contrôle). Comme déjà évoqué, cette corrélation pourrait être liée uniquement à l'effet du groupe, d'autant plus que le score requis pour l'inclusion des enfants au développement typique était fixé au 50^{ème} percentile, ségrégant donc largement les deux populations comme montré sur la **Figure 5**. Cette corrélation ne semble donc pas suffisante pour confirmer que ce biais vers les informations visuelles joue un rôle dans les difficultés motrices du TDC.

Les capacités de perception tactile ont donc été relativement peu étudiées chez les enfants

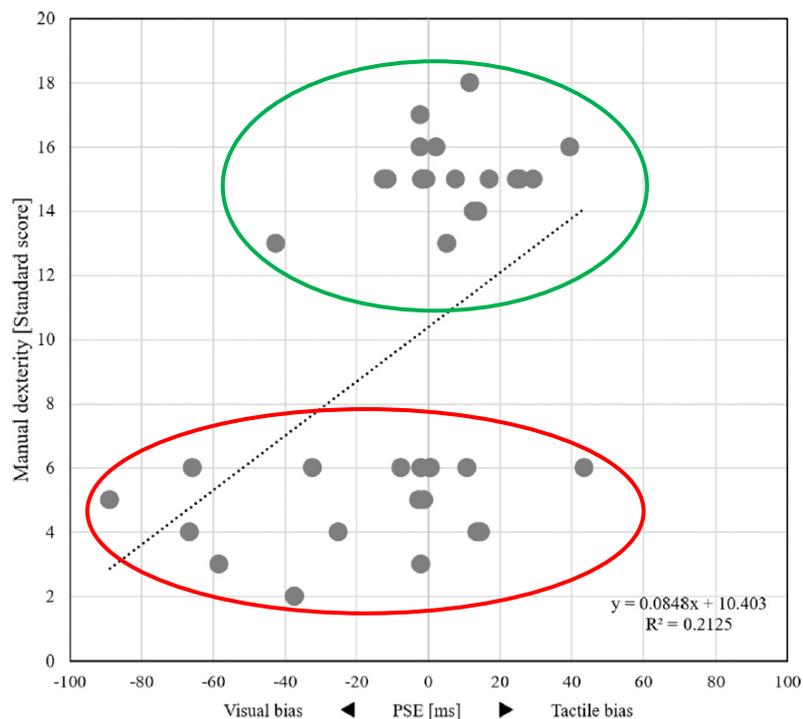


Figure 5. Issue de Nobusako et al. (2021). Adaptation de la représentation graphique de la corrélation entre le biais perceptif et le score de Dextérité manuelle du MABC-2 dans la population totale de l'étude (n=38) comprenant les enfants au développement typique (ellipse verte) et les enfants avec un TDC (ellipse rouge)

présentant un TDC, malgré l'importance de cette modalité sensorielle dans le contrôle moteur. Si la détection et la discrimination tactiles semblent préservées, les résultats concernant la localisation d'un stimulus tactile sont inconsistants (bien que peu nombreux) et suggèrent un ralentissement du traitement de l'information tactile (Nobusako et al., 2021; O'Brien et al., 2008).

IV.3.3. Perception haptique

Les autres études qui concernent le toucher dans le TDC ne seront que brièvement rapportées ici puisqu'elles proposent des tâches impliquant des compétences bien plus larges que la seule perception tactile. Parmi celles-ci, nous pouvons citer à nouveau l'étude de Elbasan et al. (2012) pour la tâche de graphesthésie qu'elle comprenait. Cette tâche, qui consiste à reconnaître des formes ou des lettres dessinées sur la surface cutanée, a montré que les enfants TDC ont plus de difficultés que les enfants au développement typique. Cependant, cette étude ne permet pas de conclure à un déficit tactile car la tâche proposée fait appel, outre la perception tactile, aux capacités de mémoire de travail, d'imagerie visuospatiale et aux capacités langagières. D'autres études ont investigué les capacités de perception haptique. Celle-ci fait référence au 'toucher actif', c'est-à-dire la capacité à percevoir les caractéristiques de l'objet (comme la forme, la texture ou l'orientation) par le biais d'un mouvement actif d'exploration de l'objet (Tseng, Holst-Wolf, et al., 2019). La perception haptique implique ainsi des signaux tactiles provenant des récepteurs cutanés mais également des signaux proprioceptifs (Sciutti et al., 2010). Par ailleurs, bien que la présence des retours sensoriels prédits via la copie d'efférence n'améliore pas la perception haptique (Sciutti et al., 2010), une dextérité manuelle performante est nécessaire lorsque la tâche nécessite la manipulation d'un objet. C'est le cas de la tâche de Schoemaker et al. (2001) dans laquelle les participants devaient reconnaître des formes en les manipulant sans vision, et les placer sur une planche d'encastrement le plus rapidement possible. Dans cette étude, les enfants présentant un TDC ont mis plus de temps que les enfants du groupe contrôle pour réaliser la tâche avec leur main dominante. Les auteurs suggèrent toutefois que cette différence entre les groupes peut être liée à la lenteur gestuelle fréquemment rapportée chez les enfants présentant un TDC. Lorsque la vitesse d'exécution de la tâche n'est pas prise en compte dans le score comme dans l'étude de Cox et al. (2015) (*i.e.* seul le nombre de formes correctement reconnues est considéré), les enfants avec TDC montrent des performances de reconnaissance d'objets ou de formes similaires aux enfants au développement typique. Enfin, Tseng et al. (2019) ont proposé deux tâches impliquant des manipulations moins complexes : dans la première tâche dite de détection haptique, les participants devaient indiquer si la forme était courbée ou linéaire, en faisant glisser leur index le long de la forme (**Figure 6**). Dans la deuxième tâche, nommée tâche de discrimination haptique, les participants devaient explorer successivement deux formes et indiquer laquelle des deux présentait la courbure la plus importante. Les auteurs rapportent un seuil de détection haptique similaire chez les enfants présentant un TDC et les enfants au développement typique. En revanche, le seuil de

discrimination haptique est décrit comme étant plus haut chez les enfants avec TDC par rapport aux enfants contrôles. La perception haptique étant multisensorielle (Sciutti et al., 2010), ce déficit peut être expliqué à la fois par un trouble tactile et par un trouble proprioceptif, mais également par un déficit de mémoire de travail (Tseng, Holst-Wolf, et al., 2019).



Figure 6. Evaluation de la perception haptique : tâche de détection haptique proposée par Tseng et al. (2019). Le participant, sans vision, fait glisser son index sur la face supérieure de la forme présentée ; il doit indiquer si la forme est plane ou convexe. Le même type de formes est utilisé pour la tâche de discrimination haptique : deux formes sont présentées l'une après l'autre, et le participant doit indiquer laquelle des deux présentaient la courbure la plus importante.

Ces études concernant la perception haptique ne permettent donc pas de statuer clairement sur la présence ou non d'un déficit de perception tactile chez les enfants présentant un TDC.

V. L'oculomotricité dans le TDC

Si le contrôle moteur du membre supérieur a été largement étudié chez l'enfant présentant un TDC, l'oculomotricité a fait l'objet de quelques études seulement. L'objectif de ce chapitre est de décrire les principaux résultats de la littérature concernant le contrôle oculomoteur, avec une attention particulière portée à la précision des saccades.

Des comportements oculomoteurs atypiques ont été mis en évidence chez ces enfants pendant certaines tâches de la 'vie réelle' comme attraper une balle (Licari et al., 2018) : par exemple, juste avant que la balle ne soit lancée, les enfants avec un TDC regardaient moins souvent la balle que les enfants au développement typique (*i.e.* moins de temps de fixation oculaire sur la balle), pour regarder à des endroits non pertinents pour la tâche. Une fois la balle lancée, les enfants avec un TDC mettaient plus de temps à initier la poursuite oculaire pour suivre la balle. Dans une tâche de saisie et soulèvement d'un objet, les enfants avec un TDC ont montré une coordination entre œil et main similaire aux enfants au développement typique, mais des fixations moins nombreuses pendant la phase de soulèvement de l'objet (Arthur et al., 2021). Warlop et al. (2020) ont complété ces observations en mettant en évidence que de jeunes adultes présentant un TDC pouvaient montrer des comportements oculomoteurs différents des adultes contrôles dans une tâche uni-manuelle d'empilement de tasses (avec notamment plus de fixations sur les tasses et la cible sur laquelle les empiler, avant le mouvement de la main), alors que les comportements étaient semblables à ceux des adultes contrôles dans une tâche bimanuelle. La perturbation des comportements oculomoteurs chez les individus avec un TDC lors d'activités de la vie courante pourrait donc dépendre de la tâche.

Outre ces études évaluant le contrôle oculomoteur dans des tâches relativement complexes, les comportements oculomoteurs élémentaires, à savoir la fixation, la poursuite et la saccade oculaires, ont fait l'objet de quelques études. A notre connaissance, trois études ont été consacrées à la poursuite oculaire et suggèrent une perturbation chez les enfants présentant un TDC. La première étude, dans une tâche de poursuite horizontale, rapporte un gain (*i.e.* le ratio de la vitesse de l'œil sur la vitesse de la cible) plus faible chez les enfants avec TDC de 5 à 7 ans (seulement 8 participants), en comparaison des enfants au développement typique (n=32) (Langaas et al., 1998). Si ce déficit de poursuite oculaire horizontale n'est pas confirmé par la deuxième étude (Robert et al. 2014) chez des enfants avec un TDC de 7 à 12 ans (n=27), celle-ci met en évidence un gain anormalement bas de la poursuite verticale. Enfin, la dernière étude

corrobore les résultats de Robert et al. sur la poursuite horizontale (gain similaire entre les populations TDC et contrôle) mais montre néanmoins des différences de comportement, avec notamment une durée de poursuite moindre (quelle que soit la vitesse de la cible, lente ou rapide) et un nombre réduit de segments de poursuite seulement lors de la poursuite rapide dans un groupe de 23 enfants avec un TDC (Sumner et al., 2018).

La fixation oculaire semble également perturbée dans le cas du TDC, même si cette compétence a été très peu étudiée. D'une part, Sumner et al. (2018) rapportent en effet que lors d'une tâche de fixation de cible stationnaire, les enfants avec TDC passent moins de temps sur la cible que les enfants contrôles et qu'ils réalisent plus de saccades en dehors de la cible ; les auteurs évoquent des difficultés d'attention et d'inhibition des saccades automatiques dans la population TDC, qui pourraient également expliquer la réduction de la durée de poursuite dans la tâche de poursuite. D'autre part, l'étude de Gonzalez et al. (2016) confirme ces difficultés d'inhibition de saccades lors de phases de fixation oculaire : dans leur tâche, les participants devaient exécuter une saccade vers une cible visuelle. Au cours de certains essais, un indice visuel apparaissait avant la cible, mais il était indiqué aux participants de maintenir le regard sur le point de fixation pendant la présentation de l'indice. Les enfants avec un TDC réalisaient plus de saccades réflexes vers l'indice visuel, indiquant une difficulté à inhiber ces saccades. Par ailleurs, un défaut d'inhibition des saccades automatiques est également compatible avec la fréquence élevée d'erreurs de direction observée chez les enfants TDC dans une tâche d'anti-saccades (*i.e.* saccades dans la direction opposée à la cible visuelle présentée) (Sumner et al., 2018).

Enfin, concernant les saccades oculaires, leur précision (en termes de biais) semble similaire chez les enfants présentant un TDC et les enfants au développement typique. Sumner et al. (2018) ont en effet montré que l'erreur d'amplitude dans une tâche de pro-saccades (*i.e.* saccades vers une cible visuelle) était similaire et très faible dans les deux populations, témoignant donc d'une précision élevée. Les résultats de Gonzalez et al. (2016) vont également dans le sens d'une précision saccadique préservée dans le TDC : l'erreur moyenne des saccades vers une cible visuelle était similaire dans les deux populations. En revanche, en ajoutant un indice visuel sur la position de la cible avant l'apparition de celle-ci, les enfants avec TDC réalisaient plus de saccades d'anticipation que les enfants du groupe contrôle (ces saccades anticipant la cible visuelle étaient réalisées vers la position mémorisée de l'indice). Ces saccades d'anticipation étant conservées dans l'analyse de l'amplitude de l'erreur, les enfants avec TDC montrent des erreurs d'amplitude de saccade plus grandes que les enfants au

développement typique en présence d'indication visuelle. Cette différence d'erreur entre les deux populations semble donc plutôt due à la différence de nature des saccades produites : saccade réactive vers une cible visuelle *versus* saccade d'anticipation vers un indice visuel mémorisé. Les auteurs suggèrent que la fréquence augmentée des saccades d'anticipation témoigne d'un défaut de contrôle inhibiteur des saccades chez les enfants avec TDC, comme évoqué précédemment.

Les études concernant les comportements oculomoteurs élémentaires dans le TDC sont très peu nombreuses, mais d'autres études impliquant des saccades dans un objectif plus large apportent des arguments en faveur de la préservation de la précision des saccades oculaires dans le TDC. Katschmarsky et collègues (2001) ont testé les performances oculomotrices des enfants avec un TDC âgés de 7 à 11 ans dans une tâche de '*double step saccade*', déjà présenté dans le chapitre III.1.1. Hypothèse de déficit des modèles internes. Pour rappel, dans cette tâche, les participants devaient produire deux saccades oculaires successives vers des cibles visuelles mémorisées, présentées brièvement pendant la latence de la première saccade. La précision de la première saccade (*i.e.* vers la première cible), programmée dans un cadre de référence rétino-topique, est rapportée comme étant similaire entre les enfants présentant un TDC et les enfants du groupe contrôle. Seule la deuxième saccade, dont la programmation (recodage de la cible dans un cadre de référence oculocentrique) doit justement prendre en compte la copie d'efférence de la première saccade, s'avère moins précise dans la population TDC. Considérés ensemble, les résultats de Katschmarsky et al. suggèrent ainsi que les enfants présentant un TDC sont capables de générer une saccade vers une cible visuelle mémorisée de manière aussi précise que les enfants sans difficulté motrice, mais montrent des difficultés à programmer une saccade sur la base du modèle prédictif (cf. chapitre III.1.1. Hypothèse de déficit des modèles internes). Pour finir, les résultats d'une autre étude sont en faveur de la préservation de la précision d'une saccade oculaire dans une tâche de pointage en '*double step*' (Wilmot et al. 2006). En effet, cette étude du couplage œil-main révèle des différences de réponse manuelle entre les enfants TDC et les enfants au développement typique, notamment concernant le timing de début du mouvement de la main vers la deuxième cible, mais pas dans les réponses oculaires associées, la précision et la latence des saccades oculaires restant similaires entre les deux populations. Le fait que même la deuxième saccade reste précise, contrairement aux résultats de Katschmarsky et collaborateurs, provient probablement du fait que la deuxième cible restait visible dans la tâche de Wilmot et al. si bien que son recodage dans un cadre de référence oculocentrique sur la base de la copie d'efférence de la première saccade n'est pas nécessaire.

En conclusion, même si les études concernant l'oculomotricité dans le TDC sont rares, elles s'accordent à montrer que la précision des saccades oculaires réalisées vers une cible visuelle unique (mémorisée ou non) est préservée chez les enfants avec un TDC. Ceci ouvre donc la possibilité d'utiliser ce système saccadique en tant qu'effecteur 'préservé' dans le cadre de l'évaluation de capacités perceptives (proprioceptives ou proprio-tactiles).

VI. Le TDC à l'âge adulte

VI.1. Symptomatologie

Il est maintenant bien établi que les difficultés motrices du TDC persistent à l'âge adulte pour une grande partie des individus : Blank et al. (2019) indiquent que 50 à 70% des enfants présentant un TDC ont des difficultés motrices dans leur vie adulte. Warlop et al. (2020) précisent que le pourcentage est différent en fonction des études, du fait des critères de diagnostic plus ou moins rigoureux ; ils rapportent des chiffres allant de 30 à 87%. Si les difficultés dans les soins d'hygiène semblent s'estomper (Kirby et al., 2011), d'autres peuvent persister tant en motricité fine qu'en motricité globale (Cousins & Smyth, 2003). Par exemple, des difficultés d'équilibre sont rapportées chez l'adulte avec un TDC (Cousins & Smyth, 2003; Tal Saban & Kirby, 2018), pouvant parfois perturber d'autres activités comme l'habillage (Scott-Roberts & Purcell, 2018). La fréquence de chutes est également plus élevée que chez les adultes neurotypiques (Scott-Roberts & Purcell, 2018) et l'évitement d'obstacles peut être difficile (Cousins & Smyth, 2003). Les adultes avec un TDC ont tendance à éviter les activités sportives, notamment les jeux d'équipe (Kirby et al., 2011; Tal Saban & Kirby, 2018) et rapportent des difficultés avec les jeux de balles (Blank et al., 2019). Les activités de dextérité manuelle sont également perturbées, tant dans des tâches de pegboard que dans des activités plus écologiques comme l'écriture (Cousins & Smyth, 2003; Kirby et al., 2011; Tal Saban & Kirby, 2018). La lenteur d'exécution motrice est toujours présente (Cousins & Smyth, 2003), tout comme la maladresse, également décrite par les parents (Kirby et al., 2011). Enfin, de nouvelles plaintes émergent à l'âge adulte notamment pour l'acquisition de la conduite automobile (Kirby et al., 2011; Tal Saban & Kirby, 2018). La qualité de vie des adultes avec un TDC, bien que peu étudiée actuellement, semble plus faible que celles d'adultes neurotypiques (Hill et al., 2011; Tal-Saban et al., 2014), ainsi que la capacité à trouver et maintenir un emploi (Tal Saban & Kirby, 2018).

VI.2. Diagnostic

Etudier le TDC à l'âge adulte paraît donc essentiel au vu de la persistance et de l'ampleur des difficultés rencontrées par ces individus. Le nombre de recherches sur cette population reste limité, même si l'intérêt scientifique est grandissant. Le manque d'outil standardisé pour

évaluer les compétences motrices des adultes témoigne de l'intérêt récent pour le TDC à l'âge adulte : en effet, jusqu'à maintenant, seul le BOT-2 permettait d'évaluer de jeunes adultes avec des normes proposées jusqu'à l'âge de 21 ans. Le rapport de l'EACD recommandait alors d'utiliser, pour le diagnostic de jeunes adultes, le BOT-2 ou le MABC-2, en utilisant les normes de la tranche d'âge 16 ans – 16 ans 11 mois pour ce dernier (Blank et al., 2019). Depuis la fin d'année 2023, la troisième édition du MABC permet d'évaluer des adultes jusqu'à 25 ans. Les normes françaises ainsi que la traduction ne sont pas encore disponibles, mais leur publication prochaine permettra de faciliter le diagnostic dans le domaine clinique et de mieux identifier les adultes présentant un TDC dans le cadre de la recherche. De même, l'évaluation du retentissement des difficultés motrices sur les AVQ chez les adultes est encore limitée puisque très peu d'outils sont disponibles. Le questionnaire 'Adult Developmental coordination disorders/Dyspraxia Checklist' (ADC) (Kirby et al., 2010) est le plus utilisé actuellement dans la littérature scientifique, mais aucune traduction française n'a été validée à ce jour. De plus, peu d'études ont évalué ses capacités psychométriques (Blank et al., 2019). Ce questionnaire auto-administré comprend deux sections : la première s'intéresse aux difficultés éprouvées dans l'enfance (10 questions), la deuxième est focalisée sur le fonctionnement à l'âge adulte (auto-rapporté et rapporté par l'entourage) et investigate les AVQ, l'organisation dans le quotidien, l'apprentissage de nouvelles compétences, les activités physiques et de loisirs et l'écriture (30 questions). Le calcul du score ainsi que les scores seuil décrits initialement ont été révisés par Kirby (2011) : un score entre 0 et 3 est attribué à chacun des 40 items pour mesurer la fréquence de la difficulté rapportée par le patient. Un score minimum de 17 est considéré comme confirmant la présence de difficultés dans l'enfance. Si ce score est atteint, le score total des deux sections peut être calculé ; Kirby (2011) indique un score minimum de 56 pour la catégorie 'à risque de TDC', et un score de 65 ou plus pour évoquer un 'TDC probable'. Du fait du manque de sensibilité pour détecter le TDC (Hyde et al., 2018) et le manque d'étude psychométrique sur le questionnaire ADC, Hyde et al. (2014) ont utilisé comme critères d'inclusion de nouveaux scores basés sur l'intervalle de confiance à 95% des scores de leur groupe contrôle de 47 adultes neurotypiques : un score seuil évoquant des difficultés motrices fixé à 6 ou plus pour la section 1 (i.e. difficultés dans l'enfance), et un score total fixé à 25. D'autres études par la suite ont utilisés ces scores seuils (Hyde et al., 2018; Tseng et al., 2022). Dans un article visant à valider une version allemande du questionnaire, Meachon et al. (2022) rapportent que les adultes neurotypiques étaient correctement catégorisés en utilisant les scores seuils de Kirby (2011). En revanche, 5 adultes avec un TDC sur les 25 inclus dans cet article

obtenaient un score inférieur au seuil ‘à risque’, soit 20% des adultes avec un TDC, confirmant que les scores seuils décrits par Kirby (2011) doivent être considérés avec précaution.

VI.3. Déficiences perceptives somatosensorielles chez l’adulte avec un TDC

La recherche concernant le TDC à l’âge adulte, outre son intérêt en tant que tel, a également une importance dans la compréhension des mécanismes sous-jacents du trouble : la persistance ou non des déficiences pourrait permettre de distinguer un retard de développement d’une déviance à la norme (Blank et al., 2019), et de mieux identifier le ou les déficiences principaux, possiblement à l’origine du TDC. Nous allons ici nous intéresser particulièrement aux résultats de la littérature concernant les capacités perceptives somatosensorielles chez l’adulte avec un TDC.

Si les capacités proprioceptives ont été investiguées chez l’enfant avec un TDC, elles ne le sont que très peu chez l’adulte. En effet, à notre connaissance, seule l’étude de Tseng et al. (2022) a évalué ces capacités chez des jeunes adultes avec TDC (âgés de 19 à 23 ans), en proposant des tâches ipsilatérale et controlatérale de repositionnement actif du poignet, similaires à celles utilisées par la même équipe chez les enfants avec un TDC (Tseng et al., 2018, 2019). Ils observent que comme chez l’enfant, l’erreur moyenne est similaire entre les populations typique et TDC, mais la variabilité de l’erreur est plus importante chez les adultes avec un TDC, quel que soit le type de tâche (ipsilatérale ou controlatérale). Ils retrouvent donc des performances proprioceptives altérées chez l’adulte avec un TDC, avec un déficit mis en évidence seulement pour la variabilité des réponses. Holst-Wolf et al. (2016) rapportent que l’amélioration des capacités proprioceptives liée au développement typique consiste en une diminution de l’erreur variable et non du biais. Un retard de développement proprioceptif serait donc visible plutôt sur la variabilité, en accord avec les résultats de Tseng et al. (2022). Notons cependant que cette étude a utilisé comme mesure une réponse motrice active, pouvant induire un facteur confondant dans l’interprétation du déficit retrouvé chez les adultes avec TDC. Les chercheurs ont également investigué le lien entre ces capacités proprioceptives et les performances motrices, évaluées par le BOT-2. Ils rapportent une absence de corrélation entre l’erreur moyenne (*i.e.* le biais) et les performances motrices, que ce soit dans la population totale ou dans la population TDC ou contrôle seule. En revanche, ils ont observé une corrélation entre la variabilité des erreurs dans la tâche ipsilatérale et le sous-score de coordination globale (*‘body coordination’*) du BOT-2, lorsque l’analyse était réalisée dans toute la population, et également

au sein du groupe contrôle, mais pas du groupe TDC. Ce sous-score de coordination globale comprend une épreuve de coordination bilatérale et une épreuve d'équilibre. En accord avec les résultats mis en évidence chez l'enfant avec un TDC, il semble donc que l'acuité proprioceptive (bien qu'évaluée ici avec un possible facteur moteur confondant) et les performances de coordination globale - dont l'équilibre – soit liée. L'absence de corrélation dans le groupe TDC peut s'expliquer par le faible nombre de participants inclus (n=10) alors que le groupe contrôle est constitué de 20 participants.

Concernant les capacités tactiles, à notre connaissance, aucune étude n'a été publiée chez l'adulte présentant un TDC.

Comme nous l'avons vu précédemment, certaines études suggèrent un déficit perceptif somatosensoriel chez l'enfant avec un TDC. Au vu de la quasi-absence d'étude sur les capacités somatosensorielles des adultes avec un TDC et compte tenu de l'importance de ces capacités dans le contrôle moteur, l'investigation des capacités proprioceptives et tactiles paraît nécessaire, dans le but de mieux comprendre la persistance des difficultés motrices.

VI.4. L'oculomotricité

Une étude récente a évalué les comportements oculomoteurs élémentaires des adultes présentant un TDC, âgés de 21 à 46 ans, en proposant le même protocole que celui réalisé chez les enfants avec un TDC dans leur étude de 2018 (Sumner & Hill, 2024). Concernant la poursuite oculaire, les adultes avec un TDC ont montré des performances similaires à celles des adultes neurotypiques lors des essais lents. En revanche, le gain était plus faible et la durée de la poursuite oculaire était plus courte, en comparaison aux adultes contrôles, lors de la tâche de poursuite rapide. Les performances de poursuite des adultes avec un TDC semblent donc moins perturbées que celles des enfants avec un TDC, puisque la poursuite lente ne semble plus altérée. La fixation oculaire a également été évaluée : sur une tâche de fixation de 30 secondes, les adultes avec un TDC réalisaient plus de saccades en dehors de la cible par rapport aux adultes neurotypiques ; ils ont également passé moins de temps en fixation sur la cible, et la durée moyenne de chaque fixation oculaire était moindre. Ces résultats suggéraient, comme chez les enfants, une difficulté à maintenir l'attention et à inhiber les saccades automatiques. Enfin, concernant les saccades, l'amplitude et la latence des pro-saccades (*i.e.* vers une cible visuelle) n'étaient pas perturbées chez les adultes avec un TDC. En revanche, la latence des anti-saccades (*i.e.* dans la direction opposée à la cible visuelle) était plus longue et le nombre

d'erreurs de direction était également plus important dans le groupe TDC, en lien avec la difficulté à inhiber les saccades automatiques.

Bien qu'il s'agisse, à notre connaissance, de la seule étude ayant investigué les comportements oculomoteurs élémentaires chez l'adulte avec TDC, les résultats de celle-ci, incluant 21 adultes avec TDC et 21 adultes contrôles, sont similaires à ceux retrouvés chez l'enfant avec un TDC, excepté l'absence de déficit en poursuite lente chez l'adulte. La consistance des résultats semble donc en faveur d'une capacité préservée à planifier et exécuter des saccades simples vers une cible visuelle.

PROBLEMATIQUE

Au vu de la prévalence importante de ce trouble et de ses répercussions négatives sur la vie quotidienne des patients, la compréhension des mécanismes sous-jacents du TDC constitue un enjeu sociétal majeur. Différentes hypothèses étiologiques du TDC sont décrites dans la littérature. Si l'hypothèse d'un déficit des modèles internes est la plus largement étudiée, elle reste débattue et plusieurs déficits concomitants pourraient causer l'ensemble du trouble.

Comme détaillé dans la première partie de l'introduction, la perception et l'exécution motrice sont intimement liées. Les informations perceptives – visuelles, proprioceptives et tactiles notamment – sont en effet nécessaires pour contrôler nos gestes puisqu'elles permettent de construire et mettre à jour les modèles internes lors d'un apprentissage moteur, et également d'être comparées aux prédictions sensorielles (disponibles grâce aux modèles internes) afin de contrôler, et si nécessaire corriger la trajectoire du mouvement en cours d'exécution. Ainsi, des informations perceptives imprécises peuvent conduire à un contrôle moteur de moins bonne qualité. Au sein de ces déficits perceptifs, ceux de la modalité visuelle constituent l'une des hypothèses explicatives du TDC. En effet, des déficits visuo-spatiaux ont été mis en évidence. Cependant, une proportion importante des enfants avec un TDC ne présente pas de déficits visuo-spatiaux. De plus, la corrélation entre ceux-ci et les difficultés motrices reste débattue. Enfin, les enfants avec un TDC ont (pour la plupart) également des difficultés pour des actions réalisées sans l'aide de la vision, comme certaines activités de soins personnels telles que se coiffer. Ainsi, l'hypothèse de déficits visuels ne peut donc pas expliquer la totalité des difficultés motrices retrouvées dans le TDC. Les autres modalités sensorielles – proprioceptive et tactile - pourraient alors avoir un rôle dans l'étiologie du trouble. Si la présence de troubles proprioceptifs est relativement admise dans la littérature sur le TDC, les preuves expérimentales de ces déficits sont discutables. En effet, la plupart des études ont investigué l'acuité proprioceptive par le biais de tâches motrices du membre supérieur, comme des tâches de repositionnement actif ou des tâches de pointage par exemple, impliquant donc une modalité motrice de réponse qui précisément est perturbée dans le TDC. Malgré l'existence de plusieurs études en faveur d'un déficit proprioceptif, ce biais méthodologique ne permet pas de statuer de manière ferme. Quelques rares études ont utilisé des tâches passives de repositionnement, de discrimination de positions ou de détection de mouvement, évitant alors le facteur moteur confondant. Cependant, outre leur faible nombre (seulement trois à notre connaissance), ces études présentent d'autres facteurs confondants : les tâches de repositionnement et de

discrimination de positions impliquaient la mémoire de travail, possiblement perturbée dans le TDC ; la tâche de détection de mouvement était basée sur le temps de réaction, qui peut paraître altéré du simple fait de la lenteur généralisée présente dans le TDC. Concernant la contribution du toucher dans le TDC, le nombre très faible d'études ne permet pas d'établir des conclusions définitives : si les capacités élémentaires (*i.e.* la détection tactile) semblent préservées dans le TDC, la perception tactile spatiale a conduit à des résultats discordants et mérite d'être plus largement investiguée. De plus, les déficits proprioceptifs et tactiles nécessitent d'être mieux caractérisés : le système somatosensoriel est-il altéré en termes de précision ou le traitement des afférences est-il seulement ralenti ? En effet, la lenteur d'exécution motrice pourrait être en lien avec une lenteur du traitement de l'information perceptive : ralentir le mouvement permettrait de donner plus de temps pour traiter les afférences, dans le but de les utiliser pour le contrôle du mouvement.

L'objectif général de ce travail de thèse est d'investiguer les capacités perceptives – proprioceptives et tactiles – dans le TDC, en tentant d'éviter tout biais moteur confondant. Dans ce but, nous avons développé deux tâches de localisation de cibles somatosensorielles, chacune impliquant à la fois une réponse motrice de l'effecteur manuel (perturbé dans le TDC) controlatéral à la cible et une réponse oculomotrice saccadique. Comme nous l'avons précédemment détaillé dans l'introduction, la précision des saccades 'simples' est préservée dans le TDC, ce qui nous permet d'évaluer les capacités somatosensorielles sans risque de mesurer une imprécision liée à l'exécution motrice.

Pour confirmer la pertinence d'utiliser les saccades oculaires comme modalité de réponse dans une tâche de localisation somatosensorielle, il est nécessaire de comparer chez le sujet sain la précision des saccades et des pointages manuels vers des cibles somatosensorielles, et de confirmer l'accès à des représentations corporelles similaires pour les deux effecteurs – manuel et oculaire. Les saccades somatosensorielles ont été relativement peu étudiées chez le sujet sain. A notre connaissance, seule une étude a comparé la précision de ces saccades aux réponses de pointage manuel, montrant une meilleure précision de ces derniers ; ce résultat isolé est difficilement généralisable à d'autres situations comportementales et à d'autres groupes de participants.

Le **premier objectif** de ce travail de thèse est donc de comparer la précision d'un pointage manuel et d'une saccade oculaire, vers une cible proprioceptive ou proprio-tactile chez le sujet adulte neurotypique, dans des tâches identiques à celles que nous avons développées pour tester

les participants présentant un TDC (enfants et adultes). La première étude présentée dans le chapitre suivant permet de répondre à cet objectif.

Après avoir confirmé la pertinence d'utiliser les saccades oculaires comme effecteur pour une tâche de localisation de cibles somatosensorielles, le **deuxième objectif** de ma thèse a été de déterminer les capacités proprioceptives et tactiles chez les enfants présentant un TDC, et d'en préciser la nature (imprécision ou ralentissement du système perceptif), ainsi que d'évaluer le lien entre ces capacités perceptives et les performances motrices.

Nous avons vu précédemment que les difficultés motrices du TDC persistent au cours de l'adolescence et de la vie adulte pour une grande proportion de patients. Malgré ces difficultés fréquentes et leur retentissement sur la vie quotidienne, le TDC est encore peu étudié chez l'adulte. Notamment, les capacités proprioceptives et tactiles n'ont, à notre connaissance, quasiment jamais été évaluées. Pourtant, une telle étude permettrait de mieux comprendre l'étiologie du TDC, en précisant les déficits spécifiques qui perdurent et ceux qui s'estompent ou sont compensés avec le développement et/ou l'expérience. En effet, la question de la déviance à la norme ou d'un retard de développement est toujours débattue dans le cas du TDC. Le **troisième objectif** de ce travail de thèse est donc d'évaluer les capacités proprioceptives et tactiles des adultes avec un TDC. Pour cela, nous avons proposé les mêmes tâches de localisation de cibles somatosensorielles, par le biais de pointages manuels et de saccades oculaires.

CONTRIBUTIONS EXPERIMENTALES

Etude 1 :

Naffrechoux M., Koun E., Volland F., Farnè A.*, Roy A.C.*, Pélisson D*. (2024). Eyes and hand are both reliable at localizing somatosensory targets. *Experimental Brain Research*. <https://doi.org/10.1007/s00221-024-06922-8>

Abstract

Body representations (BR) for action are critical to perform accurate movements. Yet, behavioral measures suggest that BR are distorted even in healthy people. However, the upper limb has mostly been used as a probe so far, making difficult to decide whether BR are truly distorted or whether this depends on the effector used as a readout. Here, we aimed to assess in healthy humans the accuracy of the eye and hand effectors in localizing somatosensory targets, to determine whether they may probe BR similarly. Twenty-six participants completed two localization tasks in which they had to localize an unseen target (proprioceptive or tactile) with either their eyes or hand. Linear mixed model revealed in both tasks a larger horizontal (but not vertical) localization error for the ocular than for the manual localization performance. However, despite better hand mean accuracy, manual and ocular localization performance positively correlated to each other in both tasks. Moreover, target position also affected localization performance for both eye and hand responses: accuracy was higher for the more flexed position of the elbow in the proprioceptive task and for the thumb than for the index finger in the tactile task, thus confirming previous results of better performance for the thumb. These findings indicate that the hand seems to beat the eyes along the horizontal axis when localizing somatosensory targets, but the localization patterns revealed by the two effectors seemed to be related and characterized by the same target effect, opening the way to assess BR with the eyes when upper limb motor control is disturbed.

Keywords

Proprioception, tactile perception, manual pointing, saccades, body representations.

Data availability statement

All data and code used in this study are available on the website of the Open Science Framework (OSF) at <https://osf.io/9vmw8/>.

Eyes and hand are both reliable at localizing somatosensory targets

Marion Naffrechoux ^{1,2}, Eric Koun ¹, Frederic Volland ¹, Alessandro Farnè* ¹, Alice Catherine Roy* ²,
Denis PéliSSon* ¹

* These three authors contributed equally to the work.

¹ Integrative Multisensory Perception Action and Cognition Team of the Lyon Neuroscience Research
Center INSERM U1028 CNRS U5292 University Lyon 1, Lyon, France

² Laboratoire Dynamique Du Langage CNRS UMR 5596 University Lyon 2, Lyon, France

Corresponding author:

Marion Naffrechoux (present address)

16 avenue du Doyen Lépine

69500 Bron

France

m.naffrechoux@gmail.com

ORCID iD

Marion Naffrechoux: 0009-0001-6022-4749

Alessandro Farnè: 0000-0001-5769-3491

Denis PéliSSon: 0000-0002-9114-7758

Author contributions

MN, AF, ACR and DP designed the study. MN and EK conceived the experimental set up, FV developed its mechanical parts, EK tested the devices (eye-tracker, touchscreen, mechanical stimulator) and programmed the protocol. MN conducted the experiment, analyzed the data and drafted the manuscript. MN, AF, ACR and DP wrote the paper. All authors approved the final version of the manuscript.

Acknowledgments

This work was supported by ANR Developmental Tool mastery and ANR Bodys. MN was supported by a grant from the French Ministry of Higher Education and Research. We thank all participants who volunteered to this study. We thank S. Alouche, J.L. Borach, C. Fressard, R. Makine, and S. Terrones for administrative and informatics support, O Abdoun for statistical support and C Trouba for ethics support.

1. Introduction

Body representations (BR) elaborated in our brain are central to interact with our environment. Since Head and Holmes (1911) introduced the concept of functionally dissociable schemata, researchers tried to describe BR and to split them into two different categories (or more, see Schwoebel & Coslett, 2005; Sirigu et al., 1991). One well-established BR is termed body image and refers to a conscious representation of the body size and shape that is often opposed to a sensorimotor BR thought to deserve action planning and execution (de Vignemont, 2010; Gallagher, 1986).

This BR for action, typically referred to as body schema in neuropsychology, or body state estimate in motor control (Bahmad et al., 2020; Martel et al., 2016; Martel, Cardinali, et al., 2019), is an unconscious BR fed by several sensory inputs, which monitors changes in body posture to guide actions (Cardinali, Brozzoli, et al., 2009; de Vignemont, 2010). Indeed, to perform actions accurately, we need to access reliable information about the position and size of our body parts, relative to each other and to the environment. This estimate of the body state is critical for planning the appropriate motor commands and for correcting the movement trajectory, using respectively the inverse and forward internal models (Medendorp & Heed, 2019; Shadmehr & Krakauer, 2008). The update of this BR to keep track of changes in body related features (e.g., size, position) is thus critical to maintain accurate motor performance. Vision only partly contributes to this updating, because visual information cannot be available for all body parts at the same time and at all times. The state of the body thus results from integrated knowledge of the location of each body part in space derived from vision, but also largely from tactile and proprioceptive information (Cardinali, Brozzoli, et al., 2009; Dijkerman & de Haan, 2007; Serino & Haggard, 2010).

More recently, another BR termed body model has been proposed to store limb length and shape estimates, which combined with somatosensory information coming from joints, muscles spindles and skin receptors, allow to localize body part relative to the body and to the environment (Longo, 2022; Longo & Haggard, 2010; see also Medina & Coslett, 2016). Although initially considered as a BR for perception, it has recently been proposed that action tasks do also rely on the body model (Bassolino & Becchio, 2023; Coelho & Gonzalez, 2024; Peviani et al., 2020; Peviani & Bottini, 2018).

Interestingly, several studies investigating BR using tactile and proprioceptive localization tasks have found that body representations are distorted. BR distortions are well established in

psychiatric or neurological conditions, such as eating disorders (Keizer et al., 2011) or phantom sensations in amputated patients (Ramachandran & Hirstein, 1998 but see Amoruso et al., 2023). Remarkably, BR distortions are also present in healthy people (for an authoritative review, see Longo (2022), raising the question of how then can they guide actions appropriately (Bassolino & Becchio, 2023). Indeed, a highly consistent pattern of distortions has been described in healthy adults, consisting of a trend to overestimate the width and underestimate the length of the hand, forearm, leg or face (Ingram et al., 2019; Longo, 2017; Longo et al., 2015; Longo & Haggard, 2010; Medina & Coslett, 2016b; Mora et al., 2018; Stone et al., 2018). As pointed out by Ingram and colleagues (2019), this pattern could emerge from inaccurate localization abilities. In this respect, the distortions elaborated from proprioceptive or proprioceptive-tactile information have been mostly studied using the (opposite) hand effector as a probe, the tasks involving pointing responses with a fingertip or a hand-held stick. As notable exceptions, two recent studies compared manual localization of hand-related landmarks with either verbal (Ingram et al., 2019) or ocular localization (Matsumiya, 2022) and found in both cases similar distortions of hand shape, that is an overestimated width and underestimated length of the unseen hand. The latter study described the shape of the hand representation (i.e. the body model) by localizing different landmarks and then calculating the relative distances between estimated positions. However, this study did not report the absolute accuracy of these estimates for the ocular and manual effectors. Furthermore, Matsumiya assessed eye and hand at the same time, making it unclear whether these two effectors are equally accurate when used separately. In contrast, Ingram and colleagues (2019) analyzed not only the participants' estimate of hand shape, but also their absolute localization accuracy. Interestingly, they found that hand position was biased toward the wrist (proximal bias) and more so in the verbal than the manual version of the task, but they did not compare manual and ocular localization. Given this sparse evidence, it is important to further assess the influence of using the eye versus the hand on the absolute somatosensory localization accuracy, to ascertain whether somatosensory based information about a body part (like the hand) is similarly accessible through different effectors. Despite several similarities, these effectors indeed differ in many respects, both anatomically and functionally.

While hand and eye movements globally share several neural structures, they actually involve distinct and specific regions. At a large-scale level, brain areas involved in producing accurate goal-directed movements include first the posterior parietal cortex (PPC), which provides estimates of the body and environment states (De Brouwer et al., 2021). The frontal lobe (motor,

premotor, and supplementary motor areas) is recruited for building motor commands based on the PPC information and on the inverse internal model thought to rely on the cerebellum. The basal ganglia collaborate with the frontal lobe in making the decision whether/when to move. Finally, the cerebellum is supposedly also housing, in addition to the inverse internal model, the forward internal model required to predict the sensory consequences of the movement (Klautke et al., 2022; Shadmehr & Krakauer, 2008).

This large-scale network is common to both hand and eye movement control, but many of its components involve specialized areas. Indeed, the anatomical segregation between brainstem and spinal cord motoneuronal populations, respectively for eye and hand, is paralleled by specialized sub-areas within all the different nodes of the network (brainstem, cerebellum, basal ganglia, parietal and frontal cortices). At the parietal cortex level, the caudal part of the PPC supports the state estimation used for eye movements whereas its rostral part is involved in hand movements (Culham et al., 2006; Medendorp & Heed, 2019). At the frontal cortex level, the motor command generation involves the Frontal Eye Field (FEF) for saccades (Coiner et al., 2019), but the premotor and primary motor cortex (M1) for reaching movements (Shadmehr & Krakauer, 2008). FEF projects directly and indirectly (via the basal ganglia) to the superior colliculus and brainstem (Coiner et al., 2019), where the motor command for saccadic eye movements is fine-tuned by the action of medial cerebellar areas before driving the motoneurons in the oculomotor nuclei. The premotor cortex and M1 project directly and indirectly (through cortico-spinal tract and brainstem nuclei) to the spinal cord, providing to the spinal motoneurons the hand movement motor command fine-tuned by signals from the intermediate cerebellum.

Besides their anatomical specificities, the eye and hand motor systems also differ functionally. The ocular effector can respond very accurately to visual targets: the main saccadic response (primary saccade) is known to slightly undershoot the target but is followed by a secondary (corrective) saccade which nearly completely cancels this visual error (Becker, 1989). However, saccades toward non-visual targets are less accurate and more variable and secondary saccades do not completely cancel the eye-to-target fixation error (somatosensory saccades: Blanke & Grüsser, 2001; Groh & Sparks, 1996; Sullivan et al., 2004; auditory saccades: Frens & Van Opstal, 1995; Yao & Peck, 1997). The sensory modality of the target also affects hand movements accuracy: in the case of a visual target, its continuous presence throughout the movement increases endpoint accuracy even when the moving limb is not visible during the movement (Prablanc et al., 1986) whereas large reaching errors are typical of movements

performed in the dark to the remembered location of a visual target (Soechting & Flanders, 1989) or to a target defined by kinesthetic cues (fingertip of the contralateral hand, Tillery et al., 1994). Like other skeletal motor responses, limb reaching movements accuracy depends on several additional parameters, such as the eccentricity of the target and its size (Fitts, 1954). Also, except when very fast, limb movements are improved by the presence of visual or somesthetic feedback signals during movement execution: vision of the limb at the beginning of the movement improves pointing accuracy through automatic on-line control processes (Prablanc, Echallier, Komilis, et al., 1979); other studies in deafferented patients indicated that the integrity of somesthetic signals (proprioceptive and tactile) is important for accurate reaching (Blouin et al., 1993; Nougier et al., 1996). Hence, the different sensory feedback signals are critical to collectively ensure the endpoint accuracy of hand reaching responses. Otherwise, under conditions of attenuated feedback (e.g. fast movement and/or unseen hand), reaching errors can be largely explained by the noise in the execution of the motor command (Van Beers et al., 2004). In contrast, for the oculomotor system the reduced biomechanical complexity is associated with a smaller execution noise and the variability of the saccade endpoint is more related to target localization noise (Van Beers, 2007). This tighter link between saccade landing positions –compared to hand movement endpoint- and target spatial representation may also be explained by the fact that, unlike arm reaching movements, saccades are too fast to use sensory feedback to adjust their trajectory online. Finally, it is worth to mention another difference between these two effectors: goal-directed movements of the eyes and hand involve different reference frames and coordinate transformations (Andersen & Cui, 2009). While reaching to a visual target can use an eye-centred reference frame, it has been suggested that planning and correcting reaching movements to somatosensory targets can take place in a body-centred reference frame (Manson et al., 2019; Mueller & Fiehler, 2014). Thus, a somatosensory target encoded in a body-centred reference frame might not require any coordinate transformations to be reached by the hand. In contrast, the same somatosensory target might require a coordinate transformation into an eye-centred reference frame to be reached by an ocular saccade. As coordinate transformations are known to increase the endpoint errors (Sarlegna et al., 2009), somatosensory saccades might be less accurate as compared to hand reaching toward a somatosensory target.

In the light of such anatomo-functional differences, here we aimed at assessing the accuracy of both the eye and the hand motor systems when performing somatosensory-based localization tasks. The ability to localize the position of the hand (proprioceptive localization) and the

position of a tactile stimulus on the hand (integrating touch and proprioception) may indeed differ according to the motor effector that is used as a read-out measure. Would the use of saccades or hand pointing movements provide similar results in localizing somatosensory targets in the neurotypical population, this will have implications for the assessment of BR in general and could pave the way for innovative approaches to the study of some clinical conditions whereby these two eye and hand systems could be differently affected (e.g., Developmental Coordination Disorder, DCD).

To this aim, we presented healthy participants with two localization tasks in which either two proprioceptively defined positions, or two tactually defined ones, were used as targets. Localization responses were expressed through either an ocular saccade, or a manual pointing movement.

We expected that, given the known lower accuracy of somatosensory saccades compared to visual saccades (Groh & Sparks, 1996) and the different coordinate transformations involved for the two effectors (Manson et al., 2019; Mueller & Fiehler, 2014), the ocular effector would be less accurate than the manual effector to localize somatosensory targets. Moreover, the ability of using visual feedback during movement for the upper limb could reduce the execution-related motor noise and thus further improve the accuracy of this effector, as compared to the ocular effector. We also predicted that despite these differences, manual and ocular localization errors should positively correlate to each other, as long as these two effectors are fed by similar somatosensory spatial information.

2. Methods

2.1. Participants

Twenty-six right-handed participants (9 males and 17 females, mean age = 23.42 ± 2.62 , range 20-28) with no reported neurological, visual or somatosensory disorder were included in this study. All participants provided written informed consent prior to performing the tasks and received compensation for their participation. This study was approved by the French ethics committee (*Comité de Protection des Personnes* CPP Sud-Est IV) and procedures were in accordance with the Declaration of Helsinki (World Medical Association, 2013).

2.2. Apparatus

Participants were seated on an adjustable chair, in front of a table, keeping their head still on a chin rest. They were equipped with an eyetracker device (Pupil Core 200Hz, Pupil Labs) to

record binocular eye movements, consisting of two miniature eye cameras and one miniature scene camera mounted on lightweight glass frames. Their dominant forearm remained hidden for the whole test duration behind a vertical opaque touch screen (27", capacitive technology surface, 3M; horizontal resolution: 0.03cm, vertical resolution: 0.09cm) and strapped to a support allowing the experimenter to modify the elbow flexion in the sagittal plane (parallel to the touch screen). In the default position, the forearm was horizontal, subtending an angle of about 120° relative to the upper-arm which, thus, was flexed at the shoulder by about 60° (Fig. 1, left panel). The hand was placed in a flattened position, with the palmar side on the support, and the fingers extended and splayed.

A start press button with a nearby fixation point (a red LED) were placed approximately 30 cm from the participant's chest and 15 cm from the touchscreen.

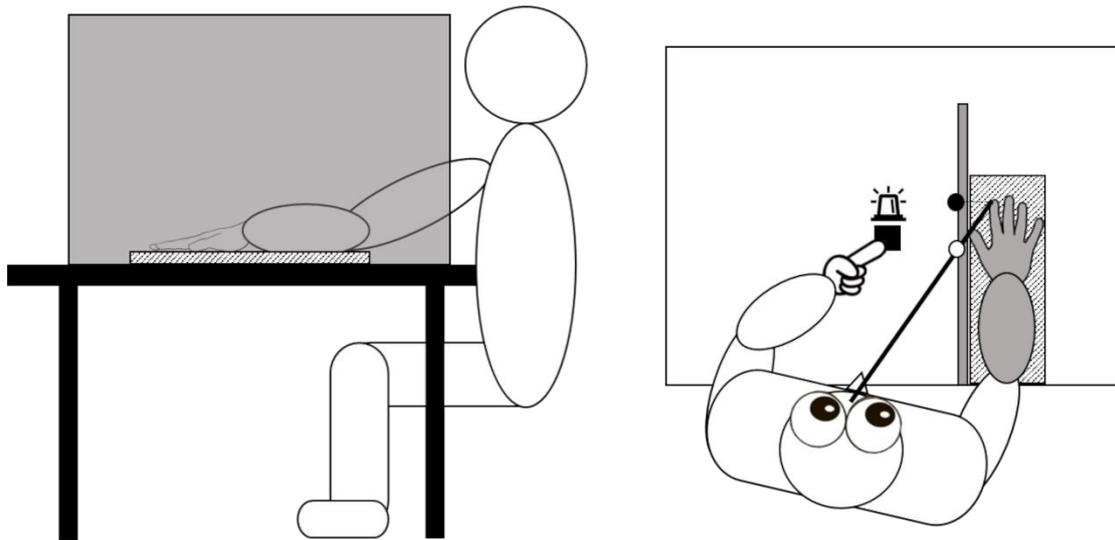


Fig. 1 Experimental set up. The dominant forearm was placed behind an opaque touch screen (grey vertical surface), on a support (hatched horizontal surface) allowing to modify the elbow flexion of the participant between each trial in the proprioceptive task. The black square represents the start button for the non-dominant arm, near the gaze fixation point (LED). Also shown is the screen-referenced point where an ideally ‘correct’ localization response would be recorded for a manual response to index fingertip localization (i.e. the orthogonal projection of the fingertip position on the touch screen, black circle), as well as the equivalent point for ocular response (white circle). The same target (here exemplified as the index fingertip) generated two different correct locations when referenced on the screen (black and white circles) as a function of the effector used as readout because of the parallax error of the ocular response (see Section 2.3.4 for the correction of the parallax error)

For the tactile localization task, two mechanical stimulators (QuaeroSys, Piezostimulator) were wrapped on the dominant hand, respectively on the distal phalanx of the index and proximal phalanx of the thumb, delivering a vibrotactile supra-threshold stimulation of 50Hz. A third vibrotactile stimulator served as a decoy and was placed next to the forearm support (without contact) in-between the other two stimulators. It was activated in synchrony with each actual tactile (finger or thumb) stimulation, to mask any auditory cues that could help localizing the tactile stimulation.

2.3. Procedure

Two localization tasks (proprioceptive localization and tactile localization) were performed in a counterbalanced order across participants. In each task, we manipulated two effectors and two target positions. Anticipating the use of this paradigm in clinical population such as DCD, hypothesized to suffer from slowed sensory processing, we additionally manipulated two encoding durations. The effector used for localization alternated across 2 blocks of trials between a pointing movement of the non-dominant arm (“manual block”) and an ocular saccade (“saccadic block”). Irrespective of the ocular or manual effector, the participants’ dominant hand and forearm remained hidden from view throughout the experiment. Their presentation order varied randomly between participants; each block type included 40 trials, i.e. 10 repetitions per combination of conditions (2 targets x 2 encoding durations) (Fig. 2).

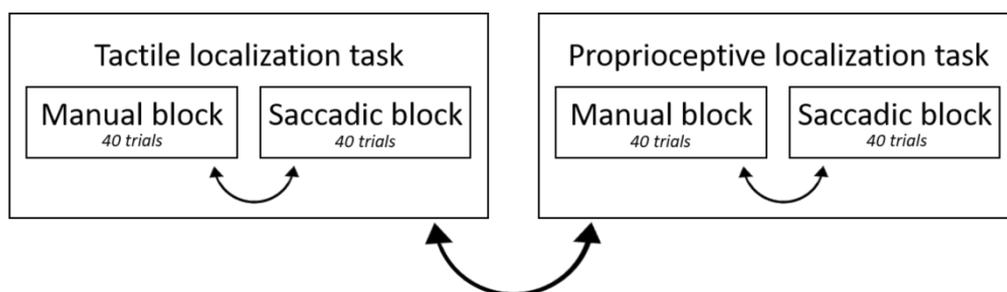


Fig. 2 Experimental design for localization tasks. Arrows indicate the randomization (between subjects) of the 2 tasks and of the 2 block types; the 2 target positions and the 2 encoding durations being randomized within each block

2.3.1. Proprioceptive localization task

To initiate each trial, participants had to press the start button with their non-dominant index finger in “manual blocks”, or to look at the LED fixation point in “saccadic blocks”. Then the experimenter randomly positioned the support of the participant’s dominant forearm in one of

the two target positions (10° or 30° of elbow flexion from the default position). The 30° target position (i.e. ~90° elbow angle relative to the upper arm) was chosen as it fell in the middle of the range of motion of the elbow, a functionally important joint position which further subtends many manual dexterity activities. The second position (10° from the default position) was chosen relative to the first target, using the same 20° separation between targets than in previous studies using proprioceptive matching tasks (Bahmad et al., 2020). After either 2 or 4 seconds of sensory encoding time (randomly interspersed), an auditory ‘go’ signal (a beep) prompted participants to localize as accurately and quickly as possible the index fingertip of their dominant-hand concealed behind the opaque screen. In “manual blocks”, participants reacted to the “go” signal by pointing onto the screen with their non-dominant index: they were instructed to aim at the estimated position of their (invisible) index fingertip (i.e. its orthogonal projection on the screen: black circle in Fig. 1). In “saccadic blocks”, the fixation point disappeared simultaneously with the “go” signal presentation, prompting participants to perform a saccadic eye movement such as to gaze at their (invisible) index fingertip (i.e. its retinal projection on the screen: white circle in Fig. 1). Then, the experimenter returned the dominant forearm to the default position and participants returned their pointing arm or eyes toward the start button or fixation point.

2.3.2. Tactile localization task

The tactile localization task was similar to the proprioceptive one, except that participants’ dominant forearm was placed in the same position (elbow flexion of 30°) during the whole task. A vibrotactile stimulation was then delivered at one of the two target positions of the dominant hand (index finger or thumb, central to manual dexterity and frequently reported to differ in hand tactile localization studies). After a sensory encoding duration of 0.2 or 1.5 seconds (randomly presented), the vibrotactile stimulation turned off and simultaneously the auditory “go” signal prompted participants to localize the (unseen) stimulation as accurately and quickly as possible, by pointing with either the non-dominant index or the eyes in “manual” and “saccadic” blocks, respectively.

2.3.3. Measure of reference points

After completion of the 2 tasks (proprioceptive and tactile), the touch screen was made transparent and we recorded for each subject and for each response modality (manual and saccadic) the reference points used for off-line analyses (see below 2.4.). For manual pointing, the experimenter placed a laser beam perpendicular to the touch screen and aligned with each

proprioceptive target and each tactile target; contacting the touch screen successively on these 4 laser beam positions provided the 4 manual reference points. For saccades, participants performed three ocular fixations on each (now visible) proprioceptive target (index fingertip at 10° and 30° of elbow flexion) and tactile target (index finger and thumb at 30° of elbow flexion); averaging the three ocular fixations yielded the 4 saccadic reference points.

2.3.4. Oculomotor calibration for parallax correction

To correct off-line the parallax effect (see below section 2.4. Data processing), we performed an oculomotor calibration by recording eye positions while each participant fixated ten regularly spaced positions aligned along the arm support behind the transparent touch screen. We also recorded the corresponding actual coordinates, i.e. the coordinates of the orthogonal projection on the touch screen of these ten calibration points. Then the linear relationship between recorded eye coordinates and actual calibration points coordinates was fitted separately for each participant.

2.4. Data processing

For “saccadic blocks”, we determined for each trial the horizontal and vertical binocular positions at the end of the primary saccade (primary eye position), and 400ms after the end of the primary saccade only for trials with the presence of a secondary saccade in this time window (secondary eye position).

These eye position signals recorded binocularly by the eye tracker were defined within the plane of the screen (for example, white circle in Fig. 1 – right panel - for the index fingertip target), but the actual targets that participants attempted to localize by gaze were located a few centimeters away. To correct for this parallax error between the measured eye position and the actual target position, we used the linear calibration function determined in each subject (see section 2.3.4). This allowed us to convert the eye position information from the eye-tracker (for each saccadic response and each saccadic reference position) into the same coordinate system (in centimeters) as if all responses were measured in the same plane. Then, differences between the calibrated saccade endpoints (primary and secondary) and calibrated saccadic reference positions were calculated, yielding for each trial the horizontal error and the vertical error.

For “manual blocks”, there was no parallax error and the horizontal and vertical errors (in centimeters) were calculated for each trial as the difference between the measured manual endpoints and the corresponding manual reference positions on both axes.

For the proprioceptive task, ocular data from 22 participants and manual data from 26 participants were included in the analysis. For the tactile task, ocular data from 22 participants and manual data from 25 participants were included in the analysis. The missing ocular data was due to poor eye tracking signal; concerning manual data, the missing data was due to a technical issue with the touch screen during the experiment.

2.5. Statistics

The study consisted in a within-subject design. Linear mixed model analyses were conducted with R software (v4.2.2; RStudio v2022.12.0) to evaluate the effects of three factors included in the model as fixed effects: *Effector* (manual vs saccadic), *Target position* (10° vs 30° of inclination for the proprioceptive task, index vs thumb for the tactile task) and *Encoding duration* (2s vs 4s for the proprioceptive task, 0.2s vs 1.5s for the tactile task). Two dependent variables were tested for each task: the horizontal and vertical localization errors. The model we used took into account the variability between subjects by including Subject as a random effect. We improved the model by adding intra-subject random slopes for the three factors (effector, target position and encoding duration); we selected the model which most reduced the residual variance without showing any convergence problem: Localization error \sim *Effector * Target position * Encoding duration + (Effector * Target position * Encoding duration) | Subject*). We used the “lme4” package for the model (Bates et al., 2015) and the “lmerTest” package (Kuznetsova et al., 2017) to obtain main effects from the lme4 output. Significant interactions were followed-up by post-hoc tests for multiple comparisons (Tukey) with the “emmeans” package (Hothorn et al., 2008).

Two analyses were conducted with the model defined above, differing from whether the localization error in the saccadic trials was determined at the end of the primary saccade (primary eye position) or 400 msec later after potential secondary saccades (secondary eye position). The Results section reports in full the outcome of the first analysis, those of the second one are added whenever differing from those of the first analysis. We report for each condition the group mean \pm standard deviation of the horizontal and vertical errors, calculated by averaging across all subjects the individual mean errors.

Pearson correlation tests with permutations (n=10000) were conducted between the mean localization error of manual responses and the mean localization error of saccadic responses, separately for each task (tactile and proprioceptive), each axis (horizontal and vertical errors),

and each target position (10°, 30°, index, thumb). We applied for each task a “FDR” correction for multiple correlations (4 correlations per task).

3. Results

3.1. The role of the effector on proprioceptive localization

3.1.1. Horizontal error

The *Effector* significantly affected ($F(1) = 7.156, p = 0.014$) the horizontal localization error: localization error was larger for the ocular response (group mean = $-4.20\text{cm} \pm 4.09$) than for the manual response (group mean = $-2.38\text{cm} \pm 3.94$) (Fig. 3). Negative values on the horizontal axis indicate proximal localization errors (i.e., responses erred toward the body).

No other main effect or interaction including *Target position* or *Encoding duration* were significant.

The results of this statistical analysis did not change when considering secondary eye position (group mean for the ocular response = $-4.54\text{cm} \pm 4.20$), despite the presence of secondary saccades in 51.33% of trials ($\pm 21.69\%$).

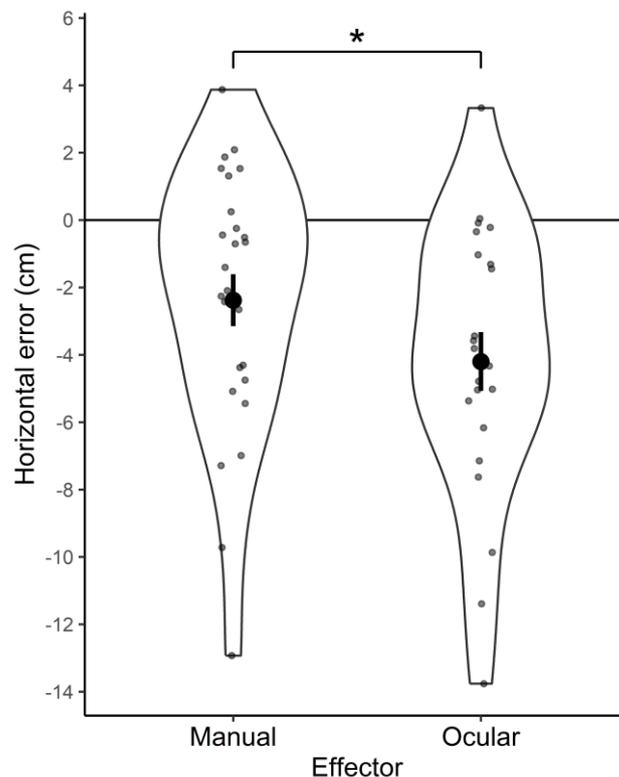


Fig. 3 Horizontal error in the proprioceptive localization task, as a function of the effector. Ocular errors (shown here as the primary eye position) were larger than manual errors. Negative

values indicate proximal horizontal errors. Black dots indicate the mean localization error, vertical lines represent the SEM. The width of curve corresponds to the density distribution of the data. Grey dots indicate individual data. Asterisk indicates significance ($p < 0.05$)

3.1.2. Vertical error

No effect of the *Effector* was observed on the vertical error ($F(1) = 0.507, p = 0.484$). *Target position* affected the vertical localization error ($F(1) = 32.454, p < 0.001$) which was larger at 10° of elbow flexion (group mean = 4.45cm ± 3.52) than at 30° (group mean = 1.58cm ± 2.40) (Fig. 4). Positive values on the vertical axis indicate upward localization errors.

Finally, we found no significant interaction between the two factors, nor main effect or interaction with *Encoding duration*.

The results of this statistical analysis did not change when taking into account the secondary eye position.

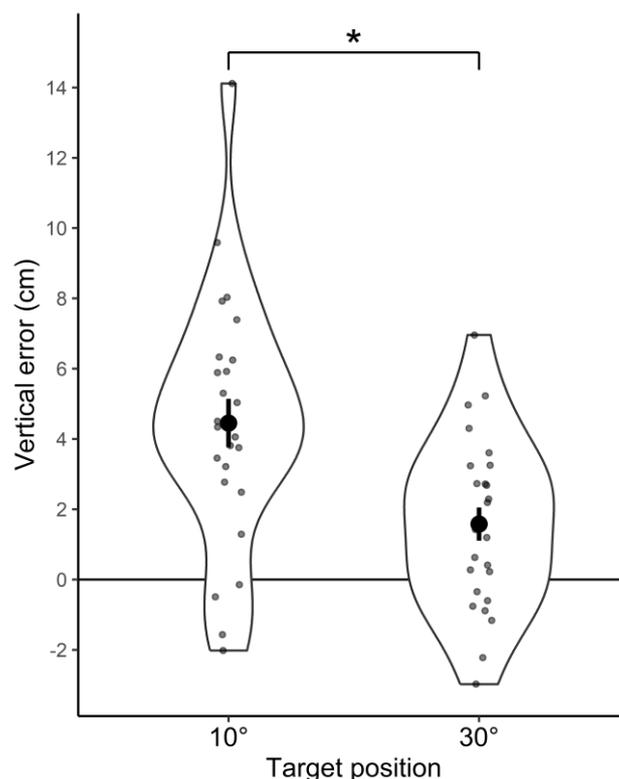


Fig. 4 Vertical error in the proprioceptive localization task, as a function of the target position. Errors were larger at 10° of elbow flexion than at 30°. Same conventions as in Fig. 3

3.2. The role of the effector on the tactile localization

3.2.1. Horizontal error

The *Effector* significantly affected the horizontal localization error in the tactile task ($F(1) = 7.241, p = 0.027$): horizontal errors were larger for the ocular response (group mean = $-4.67\text{cm} \pm 4.08$) than for the manual response (group mean = $-3.50\text{cm} \pm 3.29$) (Fig. 5).

No other main effect or interaction including *Target position* or *Encoding duration* were significant.

The analysis with secondary eye positions revealed a similar pattern of results (group mean for the ocular response = $-4.91\text{cm} \pm 4.05$), despite the presence of secondary saccades in 48.82% of trials ($\pm 19.26\%$).

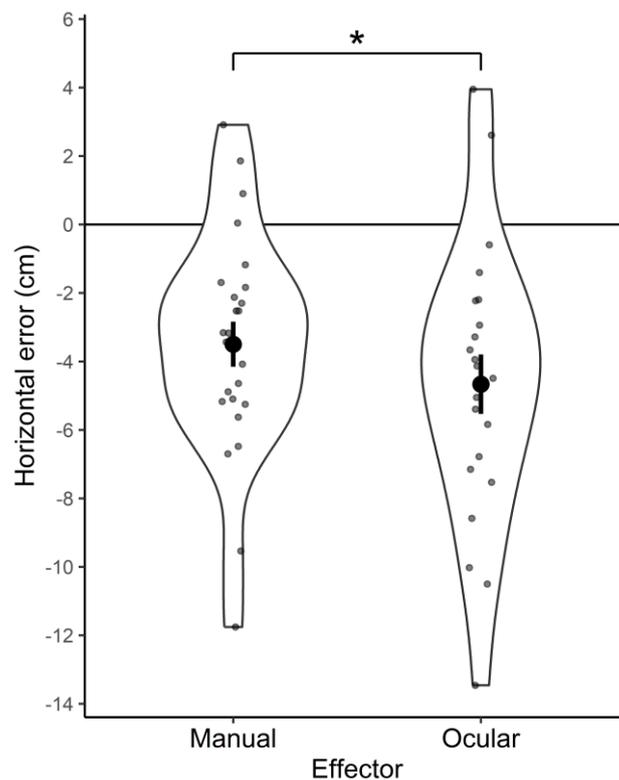


Fig. 5 Horizontal error in the tactile localization task, as a function of the effector. Ocular errors were larger than manual errors. Negative values indicate proximal horizontal errors. Same conventions as in Fig. 3

3.2.2. Vertical error

No effect of the *Effector* was observed for the vertical localization error ($F(1) = 1.841, p = 0.189$).

The analysis model revealed an effect of the *Target position* ($F(1) = 8.359, p = 0.008$), tactile stimuli applied to the index finger (mean = $-2.53\text{cm} \pm 3.84$) yielding larger vertical errors compared to the thumb (mean = $-1.55\text{cm} \pm 3.09$) (Fig. 6). Note that the negative values on the vertical axis indicate downward localization errors.

There was no interaction between *Effector* and *Target position*, nor main effect or interaction including *Encoding duration*.

An equivalent pattern of results was observed in the analysis of the vertical error after secondary saccades.

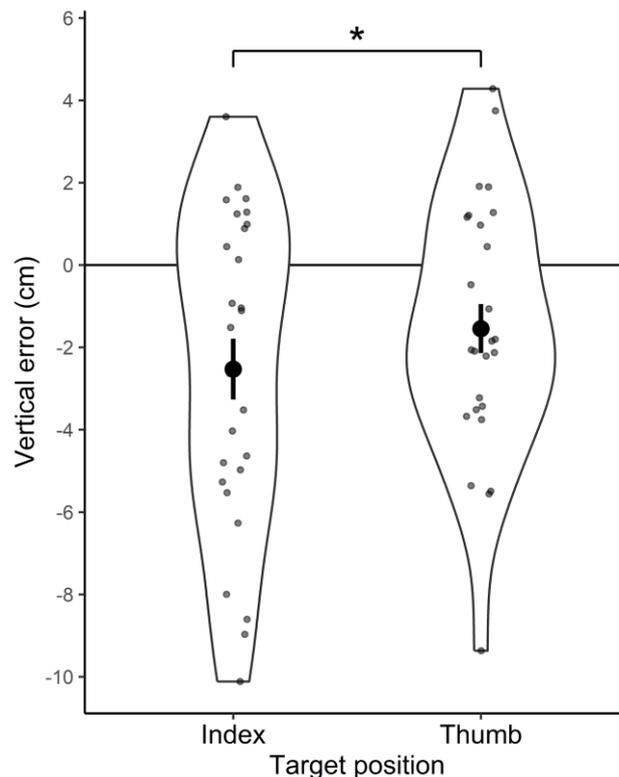


Fig. 6 Vertical error in the tactile localization task, as a function of the target position. Errors were larger for the index finger than for the thumb. Same conventions as in Fig. 3

3.3. Saccadic and manual localization errors are correlated

In the proprioceptive localization task, the ocular horizontal errors were positively correlated with the manual horizontal errors, for both *Target positions* (10° of elbow flexion, Fig. 7a: $r =$

0.70, $p < 0.001$; 30°, Fig; 7b: $r = 0.74$, $p < 0.001$). Along the vertical axis, ocular and manual errors were positively correlated only at 10° of elbow flexion ($r = 0.59$, $p = 0.003$) and did not reach significance at 30° ($r = 0.34$, $p = 0.059$).

In the tactile localization task, ocular and manual errors were positively correlated for both horizontal and vertical axes and for both *Target positions*: horizontal errors / index finger (Fig. 7c: $r = 0.62$, $p = 0.002$); horizontal errors / thumb (Fig. 7d: $r = 0.86$, $p < 0.001$); vertical errors / index finger ($r = 0.63$, $p = 0.002$); vertical errors / thumb ($r = 0.56$, $p = 0.005$).

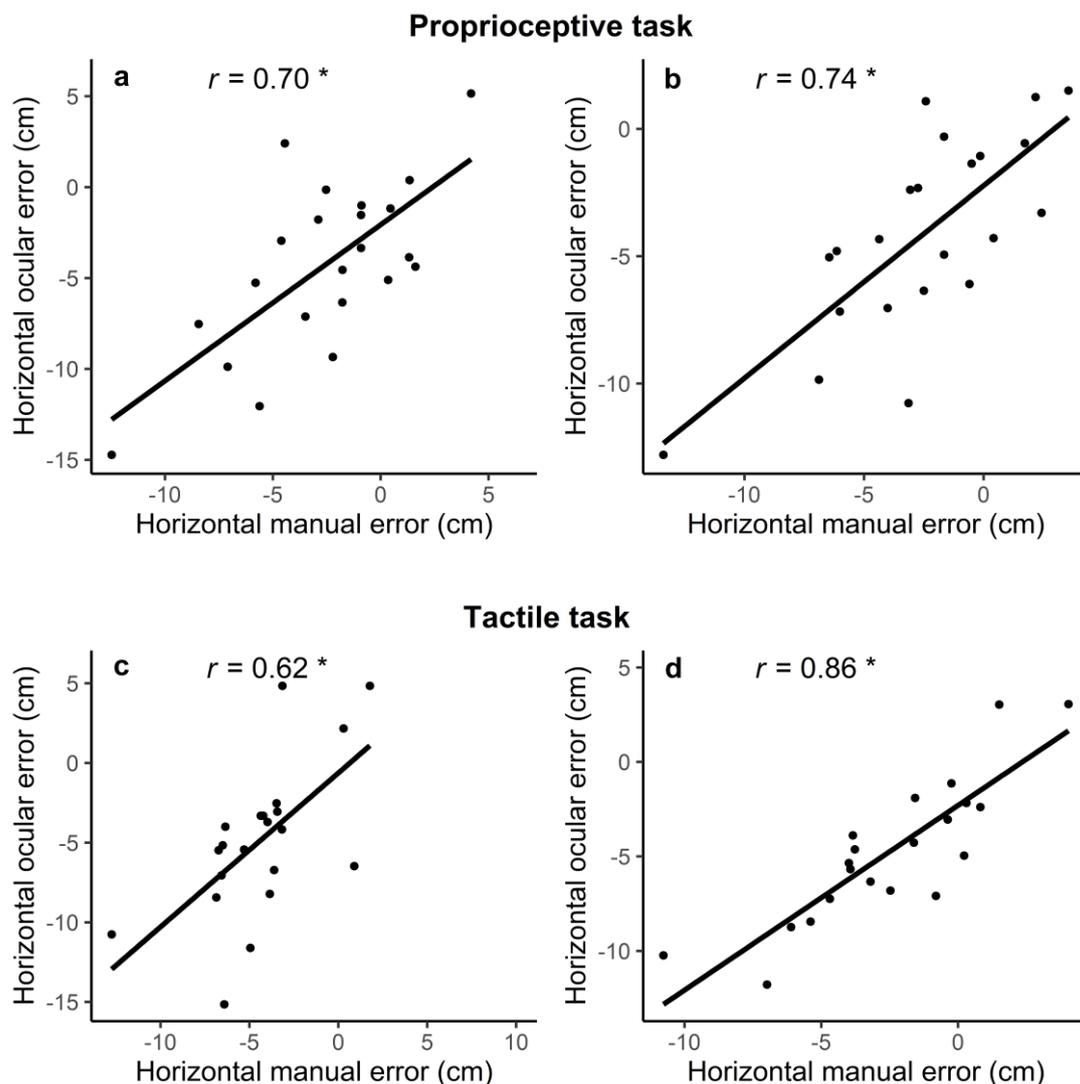


Fig. 7 Correlations between manual and ocular horizontal errors in the proprioceptive localization task at 10° of elbow flexion (a) and at 30° of elbow flexion (b) and in the tactile localization task for the index finger (c) and for the thumb (d). Each dot represents individual mean performance. Asterisks indicate significance ($p < 0.05$)

4. Discussion

In this study, we assessed the accuracy of two distinct effectors, namely eye and hand, to localize somatosensory targets that were defined either by proprioception alone, or touch and proprioception. We observed that localization accuracy differs between these two effectors: horizontal localization errors were larger with a saccadic response as compared to a manual response, for both types of targets. Despite these differences, ocular and manual errors were positively correlated, irrespective of task and error component. The second main finding of this study is that in both proprioceptive and tactile tasks the localization error was affected by target position. For the proprioceptive task, vertical errors of both ocular and manual responses were larger at 10° of elbow flexion as compared to 30° of elbow flexion. For the tactile task, ocular and manual errors along the vertical axis were larger for the index finger than for the thumb. Finally, the encoding duration of proprioceptive or touch positions did not affect the localization error.

Larger horizontal localization errors for the eyes than for the hand

We hypothesized that at natural speed conditions, the hand could take advantage of online sensory feedback compared to the ocular effector, thus yielding to more accurate landing positions. Instead, the velocity of the saccade response does not allow for online feedback to improve movement execution. The results confirmed the higher accuracy of the manual effector along the horizontal dimension to localize somatosensory targets. Noteworthy, the localization error of the saccadic response should in principle decrease when considering the secondary eye position, measured after eventual corrective saccades. Instead, we found no evidence that secondary saccades contributed to reduce this error, as analysing the localization error after those yielded similar patterns of results. On the contrary, visual inspection suggests that the horizontal localization error tended to increase after secondary saccades. The hand higher accuracy in localizing somatosensory targets may also emerge from different coordinate transformations mentioned in the introduction (Andersen & Cui, 2009; Manson et al., 2019; Mueller & Fiehler, 2014). Indeed, using the same body effector to encode the position of the somatosensory target (dominant limb) and to respond to it (non-dominant limb), could be a more favourable and less error-prone condition than transferring that somatosensory information between limb and eye neural systems.

Interestingly, Matsumiya (2022) studied BR of the unseen hand probed by eye and hand responses and did not report any quantitative difference of accuracy between both effectors, yet

several methodological differences might account for this outcome. As this study aimed at building the shape of the represented hand, localization measures were made on the relative distances between movement endpoints to several targets (i.e. fingertip and knuckles of the fingers) and not on the absolute movement endpoints to each target. These findings did not allow to infer about the accuracy of both effectors to localize a single somatosensory target. Instead Ingram and collaborators (2019) reported a higher accuracy of the hand response as compared to the verbal response to localize somatosensory targets. They suggested that the central information (i.e. the motor command) used for the pointing response gives a cue to enhance the accuracy, as compared to the verbal response. Here, by reporting congruent differences between manual and ocular localizations in both tactual and proprioceptively defined targets, we provide compelling new evidence that motor effectors may bear differential accuracy when used to probe spatial representations of somatosensory targets in the horizontal dimension.

Hand and eye reveal similar localization biases

Despite the quantitative difference in accuracy discussed above, the spatial performance reflected by each effector was correlated: localization errors, as measured with the eye or with the hand, were significantly and positively correlated to each other, for both tasks and in all but one condition (vertical error in the 30° target of the proprioceptive task). In other words, despite using distinct neural networks, manual and ocular effectors yielded tightly associated responses in localizing somatosensory targets. As spatial somatosensory inputs are supposed to constitute the major entry for the building of BR for action (Cardinali, Brozzoli, et al., 2009; Dijkerman & de Haan, 2007; Serino & Haggard, 2010), the present findings strongly suggest that both effectors may access the same body representation. This opens the possibility of assessing body representations through saccadic movements in populations of patients with motor impairments differently affecting the upper limb and the ocular system, even if the former is disturbed (e.g. after a stroke or in participants suffering from DCD). In this respect, it is also interesting to note that the manipulation of the encoding duration did not affect the localization error in either the proprioceptive or the tactile task. The shorter stimulus (2 seconds for the proprioceptive task and 200 milliseconds for the tactile task) was sufficient to build a body location estimate whose accuracy neither improved nor deteriorated when the stimulus duration was extended. This finding in our healthy population indicates that an improvement in localization accuracy in DCD patients with longer stimulus duration could reveal a slowness of their perceptual processing capabilities.

The direction of the localization error also supports the notion that both manual and ocular effectors access similar body representation. Indeed, horizontal localization errors observed in both proprioceptive and tactile tasks erred proximally, toward the body, irrespective of whether the response was manual or ocular. This finding of the proximal direction of the error is consistent with previous work: using an arm position judgement task, Wann & Ibrahim (1992) showed that the mean localization error also erred in the proximal direction. Similarly, Ingram and colleagues reported systematic proximal mislocalisation errors, irrespective of whether manual or verbal measures were used as readout (Ingram et al., 2019). Furthermore, the present findings are also in keeping with abundant evidence about the BR distortion for the hand, namely the underestimation of its length (Longo, 2022; Longo & Haggard, 2010; Matsumiya, 2022).

Localization error varies with stimulus position

The results also disclosed an effect of target position: for the proprioceptive task, the vertical localization error was larger for the 10° target position than the 30° target position, reflecting a stronger overestimation of the forearm elevation at 10° versus 30° above the horizontal plane. This finding contrasts with the results reported in a previous study assessing the proprioceptive acuity of the elbow by measuring matching responses of the contralateral arm: in a configuration similar to that used in the present study, Bahmad et al. (2020) did not report any difference in localization error between target positions. One difference which could possibly explain the divergent result is that the two target positions in their study (20° and 40° of elbow flexion from the initial position) slightly differed from ours (10° and 30°). In another study using a proprioceptive matching task, Goble & Brown (2010) reported that target location did affect the proprioceptive acuity of the elbow joint: matching errors tended to undershoot the target and increased with larger target amplitudes. Note that the results of the present study revealed an opposite pattern: larger localization errors were observed for the smallest target amplitude (10°) and participants tended to overestimate the target position. In Goble & Brown's task, the reference position from which the arm was displaced to its target location was near the maximally flexed position, such that the movement performed to reach the target position involved an elbow extension. Here, the configuration was the opposite, with an elbow flexion to reach the target position from a reference position corresponding to a largely extended elbow. Interestingly, in term of absolute elbow angle both studies point towards consistent results: errors were larger for the target position close to the maximal extension of the joint (i.e. an angle of 110° between the forearm and the arm in our study, and 105° in Goble & Brown's

study), as compared to the more flexed target position (i.e. 90° for our task and 85° for Goble's task). Adamo et al. (2007) also found this difference in accuracy as a function of target position. In addition, participants tended to undershoot the target in Goble & Brown's task, and to overshoot the target in our study, which corresponds to a too flexed response position in both cases. The acuity in localizing somatosensory targets, as defined by proprioceptive information, seems thus to depend on the absolute joint angle.

The tactile task also revealed an effect of the location of the stimulus on the localization performance: the vertical error was larger when the tactile stimulus was applied to the index finger than to the thumb. Thus, the ability to localize a tactile stimulus seems better for the thumb than for the index finger. This is consistent with previous works reporting that the representation of the thumb seems less distorted than that of the other fingers, as evidenced by a better localization accuracy (Longo, 2017; Longo & Haggard, 2010).

In conclusion, while the hand is more accurate than the eyes to localize somatosensory (proprioceptive or proprio-tactile) targets along the horizontal dimension, both effectors show the same pattern of mislocalization, with correlated errors. These findings suggest that both effectors could access the same spatial information and make it possible to use the eyes as probes to assess somatosensory localization in populations with a motor disorder affecting their upper limb.

References

- Adamo, D. E., Martin, B. J., & Brown, S. H. (2007). Age-related differences in upper limb proprioceptive acuity. *Perceptual and Motor Skills*, 104, 1297-1309.
<https://doi.org/10.2466/PMS.104.4.1297-I309>
- Amoruso, E., Terhune, D. B., Kromm, M., Kirker, S., Muret, D., & Makin, T. R. (2023). Reassessing referral of touch following peripheral deafferentation: The role of contextual bias. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 167, 167-177. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2023.04.019>
- Andersen, R. A., & Cui, H. (2009). Intention, action planning, and decision making in parietal-frontal circuits. *Neuron*, 63(5), 568-583. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2009.08.028>
- Bahmad, S., Miller, L. E., Pham, M. T., Moreau, R., Salemme, R., Koun, E., Farnè, A., & Roy, A. C. (2020). Online proprioception feeds plasticity of arm representation following tool-use in healthy aging. *Scientific Reports*, 10(1), 17275. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74455-5>
- Bassolino, M., & Becchio, C. (2023). The 'hand paradox': Distorted representations guide optimal actions. *Trends in Cognitive Sciences*, 27(1), 7-8.
<https://doi.org/10.1016/j.tics.2022.09.010>
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1). <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Becker, W. (1989). The neurobiology of saccadic eye movements. *Metrics. Reviews of Oculomotor Research*, 3, 13-67.
- Blanke, O., & Grüsser, O.-J. (2001). Saccades guided by somatosensory stimuli. *Vision Research*, 41(18), 2407-2412. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(01\)00125-0](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(01)00125-0)
- Blouin, J., Bard, C., Teasdale, N., Paillard, J., Fleury, M., Forget, R., & Lamarre, Y. (1993). Reference systems for coding spatial information in normal subjects and a deafferented patient. *Experimental Brain Research*, 93(2). <https://doi.org/10.1007/BF00228401>
- Cardinali, L., Brozzoli, C., & Farnè, A. (2009). Peripersonal Space and Body Schema: Two Labels for the Same Concept? *Brain Topography*, 21(3-4), 252-260.
<https://doi.org/10.1007/s10548-009-0092-7>

- Coelho, L. A., & Gonzalez, C. L. R. (2024). Perception, action, and the body model. *Neuropsychologia*, 196, 108853. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2024.108853>
- Coiner, B., Pan, H., Bennett, M. L., Bodien, Y. G., Iyer, S., O'Neil-Pirozzi, T. M., Leung, L., Giacino, J. T., & Stern, E. (2019). Functional neuroanatomy of the human eye movement network: A review and atlas. *Brain Structure and Function*, 224(8), 2603-2617. <https://doi.org/10.1007/s00429-019-01932-7>
- Culham, J. C., Cavina-Pratesi, C., & Singhal, A. (2006). The role of parietal cortex in visuomotor control: What have we learned from neuroimaging? *Neuropsychologia*, 44(13), 2668-2684. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2005.11.003>
- De Brouwer, A. J., Flanagan, J. R., & Spering, M. (2021). Functional Use of Eye Movements for an Acting System. *Trends in Cognitive Sciences*, 25(3), 252-263. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2020.12.006>
- de Vignemont, F. (2010). Body schema and body image—Pros and cons. *Neuropsychologia*, 48(3), 669-680. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.09.022>
- Dijkerman, H. C., & de Haan, E. H. F. (2007). Somatosensory processes subserving perception and action. *The Behavioral and Brain Sciences*, 30(2), 189-201; discussion 201-239. <https://doi.org/10.1017/S0140525X07001392>
- Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47(6), 381-391.
- Frens, M. A., & Van Opstal, A. J. (1995). A quantitative study of auditory-evoked saccadic eye movements in two dimensions. *Experimental Brain Research*, 107(1), 103-117. <https://doi.org/10.1007/BF00228022>
- Gallagher, S. (1986). Body Image and Body Schema: A Conceptual Clarification. *Journal of Mind and Behavior*, 7(4), 541-554.
- Goble, D. J., & Brown, S. H. (2010). Upper limb asymmetries in the perception of proprioceptively determined dynamic position sense. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 36(3), 768-775. <https://doi.org/10.1037/a0018392>
- Groh, J. M., & Sparks, D. L. (1996). Saccades to somatosensory targets. I. behavioral characteristics. *Journal of Neurophysiology*, 75(1), 412-427. <https://doi.org/10.1152/jn.1996.75.1.412>

- Head, H., & Holmes, G. (1911). Sensory disturbances from cerebral lesions. *Brain*, 34, 103-254.
- Hothorn, T., Bretz, F., & Westfall, P. (2008). Simultaneous inference in general parametric models. *Biometrical Journal. Biometrische Zeitschrift*, 50(3), 346-363.
<https://doi.org/10.1002/bimj.200810425>
- Ingram, L. A., Butler, A. A., Gandevia, S. C., & Walsh, L. D. (2019). Proprioceptive measurements of perceived hand position using pointing and verbal localisation tasks. *PLOS ONE*, 14(1), e0210911. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0210911>
- Keizer, A., Smeets, M. A. M., Dijkerman, H. C., van den Hout, M., Klugkist, I., van Elburg, A., & Postma, A. (2011). Tactile body image disturbance in anorexia nervosa. *Psychiatry Research*, 190(1), 115-120. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2011.04.031>
- Klautke, J., Foster, C., Medendorp, W. P., & Heed, T. (2022). Dynamic spatial coding in parietal cortex mediates tactile-motor transformation [Preprint]. *Neuroscience*.
<https://doi.org/10.1101/2022.11.12.516245>
- Kuznetsova, A., Brockhoff, P. B., & Christensen, R. H. B. (2017). lmerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. *Journal of Statistical Software*, 82, 1-26.
<https://doi.org/10.18637/jss.v082.i13>
- Longo, M. R. (2017). Expansion of Perceptual Body Maps Near – But Not Across – The Wrist. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00111>
- Longo, M. R. (2022). Distortion of mental body representations. *Trends in Cognitive Sciences*, 26(3), 241-254. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2021.11.005>
- Longo, M. R., & Haggard, P. (2010). An implicit body representation underlying human position sense. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(26), 11727-11732.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1003483107>
- Longo, M. R., Mancini, F., & Haggard, P. (2015). Implicit body representations and tactile spatial remapping. *Acta Psychologica*, 160, 77-87.
<https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2015.07.002>
- Manson, G. A., Blouin, J., Kumawat, A. S., Crainic, V. A., & Tremblay, L. (2019). Rapid online corrections for upper limb reaches to perturbed somatosensory targets: Evidence for non-visual sensorimotor transformation processes. *Experimental Brain Research*, 237(3), 839-853. <https://doi.org/10.1007/s00221-018-5448-3>

- Martel, M., Cardinali, L., Bertonati, G., Jouffrais, C., Finos, L., Farnè, A., & Roy, A. C. (2019). Somatosensory-guided tool use modifies arm representation for action. *Scientific Reports*, 9(1), 5517. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41928-1>
- Martel, M., Cardinali, L., Roy, A. C., & Farnè, A. (2016). Tool-use: An open window into body representation and its plasticity. *Cognitive Neuropsychology*, 33(1-2), 82-101. <https://doi.org/10.1080/02643294.2016.1167678>
- Matsumiya, K. (2022). Multiple representations of the body schema for the same body part. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(4), e2112318119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2112318119>
- Medendorp, W. P., & Heed, T. (2019). State estimation in posterior parietal cortex: Distinct poles of environmental and bodily states. *Progress in Neurobiology*, 183, 101691. <https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2019.101691>
- Medina, J., & Coslett, H. B. (2016). What can errors tell us about body representations? *Cognitive Neuropsychology*, 33(1-2), 5-25. <https://doi.org/10.1080/02643294.2016.1188065>
- Mora, L., Cowie, D., Banissy, M. J., & Cocchini, G. (2018). My true face: Unmasking one's own face representation. *Acta Psychologica*, 191, 63-68. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2018.08.014>
- Mueller, S., & Fiehler, K. (2014). Effector movement triggers gaze-dependent spatial coding of tactile and proprioceptive-tactile reach targets. *Neuropsychologia*, 62, 184-193. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2014.07.025>
- Nougier, V., Bard, C., Fleury, M., Teasdale, N., Cole, J., Forget, R., Paillard, J., & Lamarre, Y. (1996). Control of single-joint movements in deafferented patients: Evidence for amplitude coding rather than position control. *Experimental Brain Research*, 109(3). <https://doi.org/10.1007/BF00229632>
- Peviani, V., & Bottini, G. (2018). The distorted hand metric representation serves both perception and action. *Journal of Cognitive Psychology*, 30(8), 880-893. <https://doi.org/10.1080/20445911.2018.1538154>
- Peviani, V., Liotta, J., & Bottini, G. (2020). The motor system (partially) deceives body representation biases in absence of visual correcting cues. *Acta Psychologica*, 203, 103003. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2020.103003>

- Prablanc, C., Echallier, J. F., Komilis, E., & Jeannerod, M. (1979). Optimal response of eye and hand motor systems in pointing at a visual target. *Biological Cybernetics*, 35, 113-124. <https://doi.org/10.1007/BF00337436>
- Prablanc, C., Pélisson, D., & Goodale, M. A. (1986). Visual control of reaching movements without vision of the limb. I. Role of retinal feedback of target position in guiding the hand. *Experimental Brain Research*, 62(2), 293-302. <https://doi.org/10.1007/BF00238848>
- Ramachandran, V. S., & Hirstein, W. (1998). The perception of phantom limbs. The D. O. Hebb lecture. *Brain: A Journal of Neurology*, 121 (Pt 9), 1603-1630. <https://doi.org/10.1093/brain/121.9.1603>
- Sarlegna, F. R., Przybyla, A., & Sainburg, R. L. (2009). The influence of target sensory modality on motor planning may reflect errors in sensori-motor transformations. *Neuroscience*, 164(2), 597-610. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2009.07.057>
- Schwoebel, J., & Coslett, H. B. (2005). Evidence for multiple, distinct representations of the human body. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17(4), 543-553. <https://doi.org/10.1162/0898929053467587>
- Serino, A., & Haggard, P. (2010). Touch and the body. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 34(2), 224-236. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.04.004>
- Shadmehr, R., & Krakauer, J. W. (2008). A computational neuroanatomy for motor control. *Experimental Brain Research*, 185(3), 359-381. <https://doi.org/10.1007/s00221-008-1280-5>
- Sirigu, A., Grafman, J., Bressler, K., & Sunderland, T. (1991). Multiple representations contribute to body knowledge processing. Evidence from a case of autotopagnosia. *Brain: A Journal of Neurology*, 114 (Pt 1B), 629-642. <https://doi.org/10.1093/brain/114.1.629>
- Soechting, J. F., & Flanders, M. (1989). Sensorimotor representations for pointing to targets in three-dimensional space. *Journal of Neurophysiology*, 62(2), 582-594. <https://doi.org/10.1152/jn.1989.62.2.582>
- Stone, K. D., Keizer, A., & Dijkerman, H. C. (2018). The influence of vision, touch, and proprioception on body representation of the lower limbs. *Acta Psychologica*, 185, 22-32. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2018.01.007>
- Sullivan, A., Fitzmaurice, K., & Abel, L. A. (2004). Latency and accuracy of saccades to somatosensory targets. *Experimental Brain Research*, 154(4), 407-410. <https://doi.org/10.1007/s00221-003-1749-1>

Tillery, S. I., Flanders, M., & Soechting, J. F. (1994). Errors in kinesthetic transformations for hand apposition. *Neuroreport*, 6(1), 177-181. <https://doi.org/10.1097/00001756-199412300-00045>

Van Beers, R. J. (2007). The Sources of Variability in Saccadic Eye Movements. *The Journal of Neuroscience*, 27(33), 8757-8770. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2311-07.2007>

Van Beers, R. J., Haggard, P., & Wolpert, D. M. (2004). The Role of Execution Noise in Movement Variability. *Journal of Neurophysiology*, 91(2), 1050-1063. <https://doi.org/10.1152/jn.00652.2003>

Wann, J. P., & Ibrahim, S. F. (1992). Does limb proprioception drift? *Experimental Brain Research*, 91(1), 162-166. <https://doi.org/10.1007/BF00230024>

World Medical Association. (2013). World Medical Association Declaration of Helsinki: Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects. *JAMA*, 310(20), 2191-2194. <https://doi.org/10.1001/jama.2013.281053>

Yao, L., & Peck, C. K. (1997). Saccadic eye movements to visual and auditory targets: *Experimental Brain Research*, 115(1), 25-34. <https://doi.org/10.1007/PL00005682>

TRANSITION ENTRE ETUDE 1 ET ETUDES 2 ET 3

Notre première étude a permis de mettre en évidence, chez des adultes neurotypiques, des corrélations entre les réponses oculaires et les réponses manuelles dans des tâches de localisation de cibles somatosensorielles (proprioceptives et tactiles). Ces résultats suggèrent que les deux effecteurs accèdent aux mêmes informations perceptives, ouvrant la possibilité d'utiliser l'effecteur oculaire lorsque l'effecteur manuel est imprécis. Nous avons cependant observé une erreur plus grande des saccades oculaires, en comparaison des pointages manuels ; cette plus grande imprécision de l'effecteur oculaire pourrait venir des transformations de coordonnées effectuées pour changer de référentiel de codage.

Les deux prochaines études se focalisent sur l'évaluation des capacités somatosensorielles dans le Trouble Développementale de la Coordination, par le biais des tâches proposées dans l'étude 1. Nous nous intéresserons d'abord aux enfants avec un TDC âgés de 9 à 12 ans dans l'étude 2, puis nous présenterons les résultats préliminaires de l'étude 3 réalisée chez les adultes avec un TDC.

Etude 2 :

Spatial localization of the upper limb using touch and proprioception is altered in children with Developmental Coordination Disorder (Manuscript in preparation)

Marion Naffrechoux ^{1,2}, Alice Gomez ¹, Eric Koun ¹, Frederic Volland ¹, Alessandro Farnè* ¹,
Denis Pélisson* ¹, Alice Catherine Roy* ²

¹ Lyon Neuroscience Research Center INSERM U1028 CNRS U5292 University Lyon 1,
Lyon, France

² Laboratoire Dynamique Du Langage CNRS UMR 5596 University Lyon 2, Lyon, France

* These three authors contributed equally to the work

1. Introduction

Developmental Coordination Disorder (DCD) corresponds to a clumsiness, a slowness and an inaccuracy in motor performance. This disorder is defined in the Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders, fifth Edition (DSM-5) by the following four criteria: A - motor skills are below the expected level for age, given opportunity for skill learning; B - these motor skill difficulties significantly interfere with daily life activities and impact academic productivity, leisure and play; C - the onset of symptoms occurs in the early developmental period; D - motor skill difficulties are not better explained by intellectual delay, visual impairment, or other neurological conditions that affect movement (American Psychiatric Association, 2013). DCD affects up to 6% of school-aged children and leads to significant academic difficulties and low quality of life (Blank et al., 2019).

Despite its important prevalence, the etiology of the DCD is still debated. A prominent hypothesis attributes DCD to a deficit in internal models of movement. Internal models have been hypothesized to explain how our brain can generate predictive information critical for motor control (Shadmehr & Krakauer, 2008; Wolpert et al., 1995; Wolpert et al., 1998). Several studies reported deficits in the predictive control of DCD children (for reviews, see Adams et al., 2014; Wilson et al., 2013). Behavioural tasks that specifically taxed the predictive capacity of internal models (double-step reaching tasks, Hyde & Wilson, 2011a, 2011b; double-step saccade, Katschmarsky et al. 2001; prism adaptation, Kagerer et al., 2004, 2006; comfortable position in end-state comfort tasks, Adams et al., 2017) are typically altered in DCD participants.

An alternative, perceptual deficit, hypothesis, emerged more recently: Gomez & Sirigu (2015) extended the “noise hypothesis” of the motor system, first described by Smits-Engelsman & Wilson (2013), to a sensorimotor noise hypothesis (Gauduel et al., 2024; Gomez & Sirigu, 2015). According to this hypothesis, perceptual deficits (either noise or inaccuracy) reported in children with DCD, could contribute to their motor disabilities. Indeed, in the Optimal Feedback Control (OFC) theory (Todorov & Jordan, 2002), the sensory inputs and the sensory predictions of the movement must be combined to update the state estimation of the body and the environment (Shadmehr & Krakauer, 2008). If inaccurate, these sensory inputs (particularly visual, proprioceptive and tactile feedback) could erroneously feed the state estimate that, in turn, could result in altered motor control. Indeed, these three modalities of perceptual information are central in motor control as shown by the abundant literature, which we will describe separately for each modality.

The role of vision in motor control has long been acknowledged, both concerning the target and the acting limb. Seeing the hand at the beginning of the movement, even a glimpse at the hand starting position, enhances the accuracy of the (unseen) reaching movement (Prablanc, Echallier, Jeannerod, et al., 1979). In addition, vision of the target throughout the movement improves the endpoint accuracy even if the moving limb is not visible (Prablanc et al., 1986).

Proprioception also plays a major role in guiding our movements. Studies in deafferented patients indicate that in absence of vision of the limb, proprioceptive information is required to accurately code its spatial initial position (Nougier et al., 1996) and to coordinate multi-joint movements (Sainburg et al., 1993; Sarlegna et al., 2006). This situation of not seeing the limb before or during the movement is common in everyday life: for example, before starting to pick up a bottle of water on the table, we look at the bottle rather than the hand; if the hand is outside our visual field (i.e. not visible even in peripheral vision), its position is mostly encoded by proprioceptive information. Hepp-Reymond and colleagues (2009) also showed the critical role of proprioception by showing that handwriting was affected in a deafferented patient even when visual feedback was available. In addition, Pipereit and colleagues (2006) identified the role of proprioception in sensorimotor adaptation elicited by a mechanical perturbation of the arm reaching trajectory in healthy adults. By disrupting proprioceptive input via muscle vibration, they showed that vision of the limb is sufficient to adapt the trajectory but only to a limited extent as compared to the non-vibrated condition. Thus, proprioceptive information is central to store, update and maintain the performance of skilled motor programs.

In addition to vision and proprioception, touch is also critical to motor control as it provides information about physical properties of a touched and/or manipulated object (Johansson, 2002; Sobinov & Bensmaia, 2021). For example, a sensation of object slipping from our fingers triggers a motor response both in the distal arm muscles in order to stabilize our handgrip on the object (as shown by Edin et al., 1992 who induced anaesthesia of the fingertips) and in the proximal arm muscles to keep our hand on the object (under un-anaesthetized conditions: Forgaard et al., 2021). Thus, the grip force and the load force can both be adjusted through tactile perception. Moreover, a temporary loss of touch even modifies the reaching movements: anaesthesia of the fingertips leads to slower movements and a larger grip aperture in a reach-to-grasp task (Gentilucci et al., 1997), or to a decrease in accuracy in a reach-and-point task (Rao & Gordon, 2001). When both touch and proprioception are lost, even relatively simple prehension movements are no longer possible, or severely hampered (Jeannerod et al., 1984).

Therefore, given the major role of sensory information in motor control, the perceptual deficit hypothesis proposes that the motor slowness and inaccuracy observed in children with DCD may indirectly result from sensory deficits.

Vision has been the most largely assessed sensory modality in the DCD population, with visuospatial impairments (such as poor performance in discriminating shapes, surfaces, slopes or lines length) shown irrespective of the involvement of a motor component in the visual task (Pisella et al., 2021; Wilson et al., 2013). Thus, one could argue that visual deficits largely contribute to DCD motor control impairments. However, these visuospatial deficits cannot explain the entire pattern of motor disorders in DCD. Indeed, some daily life activities affected in DCD, such as washing hair, brushing teeth or buttoning a shirt (Zwicker et al., 2013), are performed without visual control. Furthermore, while 37 to 58% of children with DCD display visuospatial impairment or weakness, the remaining portion of children with DCD exhibit preserved visuospatial abilities despite their motor impairments (Gras et al., 2023b; Lust et al., 2022; Pisella et al., 2021; Vaivre-Douret et al., 2011).

Several studies have investigated the proprioceptive abilities in children with DCD and most of them showed lower performance as compared to typically developing (TD) children (Chen et al., 2020; Coleman et al., 2001; Elbasan et al., 2012; Li et al., 2015; Loftesnes et al., 2017; Piek & Coleman-Carman, 1995; Schoemaker et al., 2001; Tseng et al., 2018; Tseng, Tsai, et al., 2019). There are also some contrasting results reporting a preserved proprioceptive acuity (Adams et al., 2016). Moreover, some studies showed similar constant errors (i.e. similar bias) but a higher variability in children with DCD (i.e. lower precision) (Schoemaker et al., 2001; Tseng et al., 2018; Tseng, Tsai, et al., 2019) whereas some others revealed a compromised acuity including a larger bias (Chen et al., 2020; Loftesnes et al., 2017). While several different tasks were employed to assess proprioceptive abilities, most tasks required an active response of the upper limb (Elbasan et al., 2012; Loftesnes et al., 2017; Piek & Coleman-Carman, 1995; Schoemaker et al., 2001; Tseng et al., 2018; Tseng, Tsai, et al., 2019), whose motor control is precisely impaired in DCD. The use of the upper limb for the assessment of perceptual abilities may thus represent a confounding factor in the DCD population. This methodological issue makes it difficult to draw firm conclusions about proprioceptive deficits in DCD. To solve this issue, some researchers used passive tasks, such as proprioceptive discrimination (Tseng et al., 2018), ipsilateral passive matching tasks (Chen et al., 2020) or passive movement detection tasks (Li et al., 2015). However, these tasks involved working memory or fast reaction time (respectively for discriminating positions and ipsilateral matching tasks, or detecting quickly a

passive movement), which have also been reported to be altered in DCD (Henderson et al., 1992; Hyde & Wilson, 2011a). Finally, few studies have investigated the link between the proprioceptive acuity and the motor skills in children with DCD. Tseng et al. (2018) and Tseng, Tsai, et al. (2019) reported correlations between the matching error variability and motor performance assessed by the three MABC-2 sub-scores, but no correlation between the proprioceptive accuracy and motor performance. Moreover, these correlations were found only when the analysis was conducted on the entire population (DCD and control) which may be due to the main effect of a group given the relatively small sample size. Only one study reported correlation between proprioceptive accuracy and balance performance in children with DCD (Chen et al., 2020).

Surprisingly, very few studies have addressed tactile abilities in children with DCD. Elementary tactile abilities seem preserved in DCD, since similar tactile detection thresholds have been reported in DCD and typically-developing (TD) children (Cox et al., 2015; Law et al., 2011). Tactile discrimination thresholds, as assessed by two point discrimination tasks in static conditions, also seem preserved in children with DCD (Cox et al., 2015; Law et al., 2011). One study, using the double tactile stimuli perception of the battery of Ayres test, reported impaired performance in DCD children aged 9 to 12 (Elbasan et al., 2012), but the assessment procedure was not described and this subtest was removed in the latest version of this battery. Finally, Law et al. (2011) reported a higher dynamic discrimination threshold in children with DCD. Some studies assessed other features of tactile perception such as the spatial localization of a single stimulus in the somatosensory body map, but led to inconsistent findings. Elbasan et al. (2012) reported that DCD children aged 9 to 10 were impaired in naming the touched finger, whereas Cox et al. (2015) observed a preserved performance in children with DCD aged 9 to 12. The latter study revealed lower performance as compared to TD children only for the non-dominant hand of children aged 6 to 8. A recent study also revealed tactile localization deficits for the non-dominant hand of children with DCD (Gauduel et al., 2024). However, given the complexity of this type of task (Rusconi et al., 2009; Tamè et al., 2017), elements other than tactile perception may be involved. Johnston and colleagues proposed a task in which participants had to name the animal who produced the vibration on their hand (to indicate which side of their hand was vibrated) while participants held their hands either in their canonical hemispace (uncrossed condition), or in the opposite one (e.g., the left hand in the right hemispace, crossed condition) (Johnston et al., 2017). They showed that despite a crossed hand effect (increased error in the crossed vs uncrossed condition) suggested their preserved ability

to localize touch in an external reference frame, DCD children aged 7 to 11 showed in both conditions of hand position lower tactile localization performance as compared to TD children, as evidenced by a lower percentage of correct responses. Tactile function is also critical to perform haptic tasks, consisting of recognizing or discriminating shapes. Indeed, several studies reported that children with DCD have difficulties in such tasks (Schoemaker et al., 2001; Tseng, Holst-Wolf, et al., 2019), however, they cannot conclude that this is due to a tactile deficit, as haptic tasks also strongly involve manual dexterity and proprioception.

Altogether, these findings indicate that somatosensory perception (proprioception and touch) may be altered in DCD, although some of these findings are inconsistent (particularly for touch) and others may be distorted by methodological bias.

In the present study, we aimed to overcome the aforementioned bias by assessing both proprioceptive and tactile localization abilities in the same group of DCD children and an age-matched group of typically developing children (TD children). Additionally, we employed both a manual and an ocular saccadic response, as the latter is not affected in DCD children. Indeed, while performance in ocular pursuit tasks is known to be impaired in DCD (Sumner et al., 2018), several studies reported that visually guided saccades are preserved, being as accurate as those produced by TD children (Katschmarsky et al., 2001; Sumner et al., 2018; Wilmut et al., 2006). To evaluate the internal model hypothesis for eye movements, Katschmarsky et al. (2001) used a paradigm of double-step saccades (adapted from Hallett & Lightstone (1976) by Mays & Sparks (1980)): in this task, children had to perform two successive saccades toward two memorized visual targets which were briefly flashed during the 1st saccade latency period. The authors reported similar latency and accuracy of the first, ‘simple’, saccade (planned in the retino-centric reference frame of the target, without remapping) in children with DCD and TD children. In contrast, accuracy differed for the second saccade, which is precisely the one that requires a remapping of the second target location into an oculo-centric reference frame by the first saccade vector (derived from the oculomotor efference copy or internal model: Sommer & Wurtz, 2008). Sumner and colleagues (2018) then confirmed that simple saccades remain accurate in children with DCD, by showing that the accuracy and latency of simple prosaccades toward a peripheral visual target did not differ between the two groups. However, they observed difficulties in children with DCD in the fixation and antisaccade tasks; indeed, as compared to TD children, children with DCD exhibited a larger number of un-wanted saccades during the fixation task, and they made more erroneous prosaccades toward the target during the antisaccade task (despite similar latency). The authors concluded that despite difficulties in

saccadic inhibition (to maintain gaze on the fixation point or to avoid saccade toward a target), children with DCD had intact fundamental oculomotor processes. The work of Wilmot and colleagues (2006) also showed that the accuracy of a saccade toward a single visual target is similar between children with DCD and TD children. Altogether, this evidence supports the possibility of using ocular saccades as a preserved response modality to investigate proprioceptive and tactile abilities in children with DCD. Further, our previous work in healthy adults confirmed that manual and ocular performance in localizing somatosensory targets are strongly correlated (Naffrechoux et al., 2024). Taken together, these results support the relevance of using the ocular effector as a probe in children with DCD, in complement to the manual effector which is deemed inaccurate. This innovative methodology we have designed for our study could lead to significant progress in the understanding of the DCD.

The internal model hypothesis predicts that children with DCD would show larger localization error with the manual effector as compared to TD children (Hyde & Wilson, 2011a, 2011b), but similar accuracy between groups with the ocular effector because there is a single target per trial (Katschmarsky et al., 2001; Sumner et al., 2018). In contrast, the perceptual deficits hypothesis predicts that children with DCD would be less accurate than TD children in localizing somatosensory targets, irrespective of which effector is used. Finally, if the predictions of these two, non-mutually exclusive, hypotheses are combined, we would expect that children with DCD would be less accurate than TD children when using both effectors, and that the difference between groups would be larger for the manual effector as compared to the ocular effector.

Since it has also been suggested that DCD deficits may emerge from a slowed sensorimotor system, here we tested also this alternative hypothesis by allowing either short or long(er) exposure to somatosensory targets. This hypothesis would predict that children with DCD would improve their performance with the longest exposure as compared to the short one.

Lastly, regarding the perceptual deficits hypothesis, we would expect that the perceptual localization abilities would be correlated with the motor performance in the three domains assessed by the MABC-2 subtests (manual dexterity, aiming and catching, balance). In contrast, the internal model hypothesis predicts that only the localization performance of the manual effector would be correlated with the motor performance.

2. Method

2.1. Participants

Forty-five children aged 9 to 12 enrolled in this study: 25 children with DCD and 20 typically developing (TD) children. Children with DCD were referred to our lab by several occupational or psychomotor therapists as well as by the French association Dyspraxie France Dys and the health network Dys/10 (specialized in the care of developmental disorders). Exclusion criteria for both groups included intellectual disability, neurological and psychiatric conditions such as autism spectrum disorder (ASD). We also excluded children born preterm, as the potential impact of prematurity on DCD behaviour remains unsettled (Gras et al., 2023b).

All children of the DCD group had received their diagnosis before inclusion. To be included in the final DCD group, they were additionally screened by a trained physical therapist against the following 4 criteria of the DSM-5. First, they had to reach no better than the 16th percentile of the MABC-2 total score or of the manual dexterity sub-score (criterion A of the DSM-5). The impact of motor difficulties on their daily life activities (criterion B) was checked with the French version of the MABC-2 Checklist. The early onset of symptoms in the developmental period was checked with the parents (criterion C). The absence of intellectual disability or neurological conditions was verified on their medical records (criterion D). Six children with DCD were excluded because they did not fulfil criterion A. One child with DCD was excluded because of a diagnosis of ASD received after his participation and another for a lack of understanding of instructions during the MABC-2 and the experimental tasks.

Participants included in the TD group had no neurological history, no neurodevelopmental disorder and no close relatives (parents or brothers) with neurodevelopmental disorders. Also, they had to reach at least the 37th percentile for the MABC-2 total score and on the manual dexterity sub-score. Three TD children were excluded due to a low MABC-2 score, and one child was excluded because he received a diagnosis of Tourette syndrome after his participation.

A total of 17 children with DCD (mean age: 10.72; sd= 1.09; 15 boys/2 girls) and 16 typically developing (TD) children (mean age: 10.84; sd= 1.28; 11 boys/6 girls) were included in this study. The two groups were matched on manual laterality assessed by Edinburgh Handedness Inventory ($t(30.51) = -0.32, p=0.75$) and on age ($t(29.58) = -0.30, p=0.77$). Since puberty is known to alter the reliance on proprioception for motor control (Assaiante et al., 2014; Cignetti et al., 2013; Viel et al., 2009), we assessed the puberty level through the Self-Rating Scale for Pubertal Development (Carskadon & Acebo, 1993) and found no difference between groups

($t(29.94) = -0.71, p=0.48$). The two groups significantly differed on the MABC-2 Checklist ($t(16.36) = 7.43, p < 0.001$). All descriptive data are presented in Table 1.

Parents and children gave written informed consent prior to the experiment. The study conformed to the Helsinki declaration and was approved by the French ethics committee (*Comité de Protection des Personnes CPP Ouest V*). Children received a game for their participation to this study.

Group	Sexe	Laterality	Age (years)	Puberty score	MABC-2 Checklist	Total MABC-2	MD MABC-2	A&C MABC-2	Balance MABC-2
DCD (n=17)	15 boys / 2 girls	14R / 3L	10.72 ±1.09	6.71 ± 1.57	23.53 ± 12.51	4.65 ± 2.69	4.24 ± 1.68	6.88 ± 2.87	7.12 ± 3.72
TD (n=16)	11 boys / 6 girls	14R / 2L	10.84 ± 1.28	7.13 ± 1.78	0.87 ± 1.25	11.00 ± 1.37	11.13 ± 1.20	10.50 ± 2.50	10.94 ± 1.88

Table 1. Descriptive data for the two populations (children with DCD and TD children). Quantitative variables are expressed as: mean ± standard deviation. For MABC-2 total score and sub-scores: standard note. MD = Manual dexterity sub-score; A&C = Aiming and catching sub-score.

2.2. General design

The experiment was shaped after a previous work on healthy adults (Naffrechoux et al., 2024) and adapted to the younger population, by splitting the whole procedure in two sessions run on the same day or on two different days (to avoid fatigue). Each session started with a localization task (proprioceptive or tactile, in a counterbalanced order across participants), followed by the sensorimotor assessment (MABC-2 or complementary assessments, also counterbalanced, independently from the localization task order) (Figure 1). The entire procedure lasted approximately 4 hours (2 hours per session), including breaks.

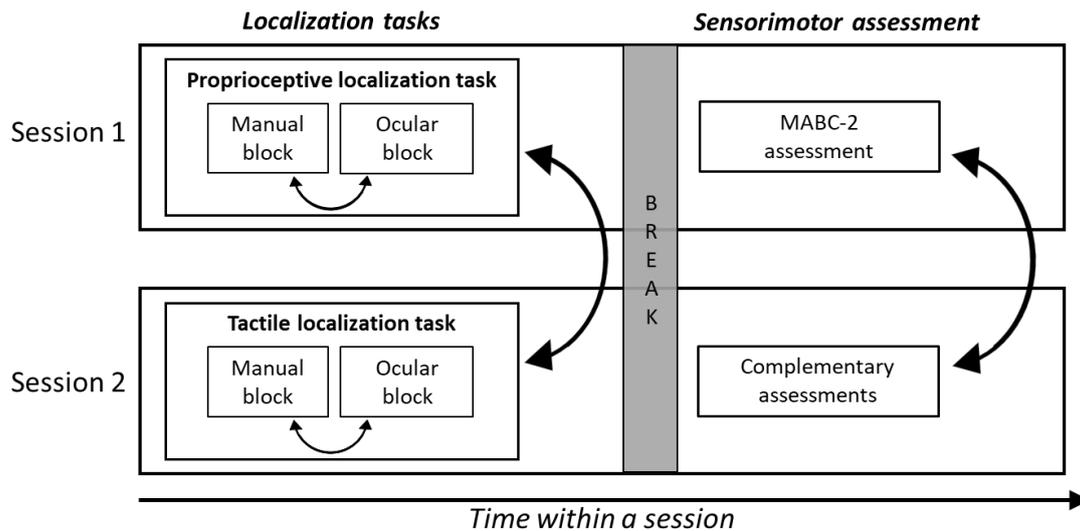


Figure 1. Experimental design. Two sessions were performed the same day or in 2 different days. Arrows indicate the three independent, between subjects randomizations of: the two localization tasks, the two block types of the localization task and the two parts of the sensorimotor assessment

Localization tasks

In each task, participants had to use either of two effectors to localize the target: a pointing movement of the non-dominant arm or an ocular saccade. The effector alternated across two blocks (manual block and ocular block), pseudorandomized between participants (figure 1). We also manipulated the target position and the encoding duration (two targets and two encoding durations per task), yielding 4 conditions per block presented in the same pseudorandom order for all participants. Each block contained 40 trials, i.e. 10 repetitions per condition.

2.3. Apparatus for the localization tasks

Children were seated on an adjustable chair, in front of a table with their head supported by an adjustable chin rest. They wore a binocular eyetracker device (Pupil Core 200Hz, Pupil Labs), consisting of a lightweight glass frame containing two miniature eye cameras and a scene camera. Their dominant forearm was hidden behind a vertical opaque touch screen (27", capacitive technology surface, 3M), positioned on a support which could be tilted by the experimenter to modify the elbow flexion in the sagittal plane. In the default position, the forearm was horizontal with the shoulder flexed at about 60° and the elbow at about 120° (Figure 2, left panel). A start switch was placed approximately 30 cm from the participant's chest and 15 cm from the touchscreen and a fixation point (a red LED) was positioned 1 cm from the start switch.

For the tactile localization task, we used two mechanical stimulators (QuaeroSys, Piezostimulator) to deliver a vibrotactile supra-threshold stimulation of 50Hz. These two stimulators were positioned on the dominant hand of the participants: one on the distal phalanx of the index and one on the proximal phalanx of the thumb. A third one was placed next to the forearm support (without contact) in-between the other two stimulators in order to serve as a decoy. It was activated in synchrony with each actual tactile (finger or thumb) stimulation, to mask any auditory cues that could help localizing the tactile stimulation.

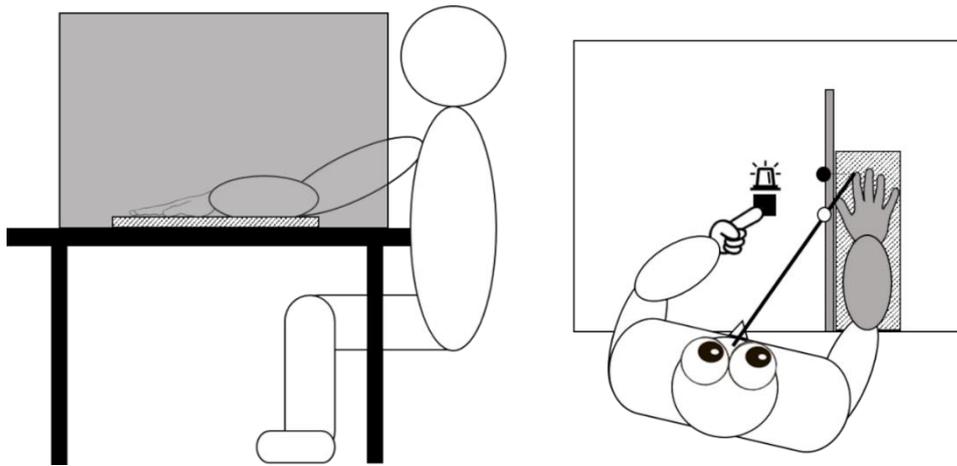


Figure 2. Experimental set up. Adapted from Naffrechoux et al. (2024). The dominant forearm was placed behind an opaque touch screen (grey vertical surface), on a support (hatched horizontal surface) allowing to modify the elbow flexion of the participant between each trial in the proprioceptive task. The black square represents the start switch for the non-dominant arm, near the gaze fixation point (LED). Also shown is the ideally ‘correct’ manual localization response to the index fingertip (i.e. the orthogonal projection of the fingertip position on the touch screen, black circle), as well as the ideally ‘correct’ ocular localization response to the same target (white circle); the difference between these screen-referenced manual and ocular endpoints (parallax error) was corrected in our analyses (see Section 2.6)

2.4. Localization tasks

2.4.1. Proprioceptive localization task

Each trial started when participants pressed the start switch with their non-dominant index finger in “manual blocks”, or looked at the LED fixation point in “saccadic blocks”. Participants maintained this starting position while the experimenter positioned their dominant forearm in one of the two target positions (10° or 30° of elbow flexion from the default position) by rotating the forearm’s support upward. The forearm remained in this position during one of the two

encoding durations (2 or 4 seconds). Then the auditory “go” signal (a beep) and the simultaneous disappearance of the fixation point in the “saccadic block”, prompted participants to localize as accurately and quickly as possible the index fingertip of their (hidden) dominant hand. In the “manual block”, children had to point with their non-dominant index finger toward the estimated position of their invisible index fingertip (i.e. its orthogonal projection on the screen: black circle in figure 2). In the “saccadic block”, participants had to perform a saccadic eye movement to direct their gaze toward the same target (i.e. white circle in figure 2). After response completion, the experimenter placed the dominant forearm back in the default position, and children returned their pointing arm toward the start switch or their eyes toward the fixation point, depending on the block.

2.4.2. Tactile localization task

The tactile localization task was similar to the proprioceptive one, except that the participants’ dominant forearm was kept in the same position (elbow flexion of 30° relative to the default position) throughout the task. In addition, a vibrotactile stimulus was delivered to one of the two target positions of the dominant hand (index finger or thumb). After a sensory encoding duration of 0.2 or 1.5 seconds, the vibrotactile stimulation was turned off and simultaneously the auditory “go” signal and the fixation point disappearance in “saccadic” blocks, prompted participants to localize the (unseen) stimulation as accurately and quickly as possible, by pointing with either their non-dominant index finger or their eyes in “manual” and “saccadic” blocks, respectively.

2.4.3. Measure of reference points

At the end of each proprioceptive and tactile task, the touch screen was made transparent and we recorded, for each subject and for each response modality (manual and saccadic), the reference points used for off-line analyses (see section 2.6. Data processing below). For manual pointing, the experimenter placed a laser beam perpendicular to the touch screen and aligned with each proprioceptive target and each tactile target; touching the touch screen successively at these 4 laser beam positions provided the 4 manual reference points. For saccades, participants performed three ocular fixations on each (now visible) proprioceptive target (index fingertip at 10° and 30° of elbow flexion) and tactile target (index finger and thumb at 30° of elbow flexion); averaging the three ocular fixations provided the 4 saccadic reference points.

2.4.4. Oculomotor calibration for parallax correction

To correct for the parallax effect off-line (see section 2.6. Data processing below), we performed an oculomotor calibration after each localization task. To do this, we recorded eye positions while each participant fixated five visual markers which were regularly spaced around each target and aligned along the arm support behind the transparent touch screen. We also recorded the corresponding actual coordinates of these calibration points, i.e. the coordinates of their orthogonal projection on the touch screen. The linear relationship between the recorded eye coordinates and the actual coordinates of the calibration points was then fitted separately for each participant and each task (as the participant's position was not exactly the same between sessions).

2.5. Complementary assessments

To capture a comprehensive participants' profile, we assessed the tactile detection and discrimination thresholds (with Semmes-Weinstein Monofilaments and two point discrimination respectively), the visuospatial abilities with EVSP (Pisella et al., 2013, 2020, 2021), the proprioceptive acuity of the elbow with ipsilateral and contralateral matching tasks, the gesture imitation proficiency (De Renzi et al., 1980) and the manual dexterity with a pegboard task (Smith et al., 2000). We also screened the attentional abilities with the French version of the Conners' Parent Rating Scale (Short Form) (Fumeaux et al., 2020, 2021). The detailed procedures for these tests are reported in the supplementary materials.

2.6. Data processing

We determined for each "saccadic" trial the horizontal and vertical eye position at the end of the primary saccade. These binocular eye position signals were defined within the plane of the screen (for example, white circle in Fig. 2 – right panel - for the index fingertip target), but the actual targets that participants attempted to localize by gaze were located a few centimeters behind the screen. To correct for this parallax error, we used the linear calibration function determined in each subject and for each session (see section 2.4.4.). This allowed us to convert the eye-tracker position information, into the same, touch screen-based, coordinate system. We then calculated the differences between these calibrated saccade endpoints and the reference positions for each trial, yielding the horizontal and the vertical error (in centimeters).

For "manual blocks", touch screen-based horizontal and vertical errors (in centimeters) were calculated for each trial as the difference between the measured manual endpoints and the corresponding manual reference positions on both axes.

For the proprioceptive task, ocular data from 26 participants (12 DCD children and 14 TD children) and manual data from 30 participants (15 DCD children and 15 TD children) were included in the analysis. For the tactile task, ocular data from 26 participants (11 DCD children and 15 TD children) and manual data from 32 participants (16 DCD children and 16 TD children) were included in the analysis. The missing ocular data were due to noisy eye signals, whereas the missing manual data were due to a technical issue with the touch screen during the experiment. Additionally, one participant with DCD did not perform the manual block of the proprioceptive task due to fatigue.

2.7. Statistics

Statistical analyses were conducted with R software (v4.2.2; RStudio v2022.12.0; R Core Team 2024). Linear Mixed Models were conducted with the “lme4” package for the model (Bates et al., 2015) and the “lmerTest” package (Kuznetsova et al., 2017) to obtain main effects from the lme4 output. Significant interactions were followed-up by post-hoc tests for multiple comparisons (Tukey) with the “emmeans” package (Hothorn et al., 2008). T-tests and correlation tests were conducted with the “stats” package.

Localization tasks. The horizontal and the vertical errors were analyzed separately for each task. Linear Mixed Models (LMM) assessed the effects of *Group* (TD/DCD), *Effector* (manual/ocular), *Target position* (10° vs 30° forearm angle for the proprioceptive task, index vs thumb for the tactile task) and *Encoding duration* (2s vs 4s for the proprioceptive task, 0.2s vs 1.5s for the tactile task), each of these factors being added as fixed effects. *Subject* was included as a random effect to consider the inter-individual variability. We added intra-subject random slopes for each within factor to reduce the residual variance without showing any convergence problem: Localization error ~ Group * Effector * Target position * Encoding duration + (Effector * Target position) | Subject).

Complementary assessments. We used a Linear Mixed Model to assess manual dexterity performance in the Nine Hole Peg Test, with the following factors as fixed effects: *Group* (TD/DCD) and *Hand* (Dominant/Non-dominant). In order to take into account the inter-individual variability, we included the *Subject* as a random effect for the intercept. A similar analysis was conducted for the relative matching error in the proprioceptive matching tasks: the Linear Mixed Model contained three factors as fixed effects: *Group* (TD/DCD), *Matching type* (Ipsilateral dominant/Ipsilateral non-dominant/Contralateral) and *Target position* (10°/30°). *Subject* was again added as a random effect. We improved the model by adding intra-subject random slopes for the two within subject factors (Matching type and Target position) and we

selected the model displaying the lowest residual variance without any convergence problem. The final model was the following: Matching error \sim Group * Matching type * Target position + (Matching type * Target position | Subject). For the remaining assessments, we conducted a series of t-tests comparing the two *Groups* (TD/DCD).

Correlations. We conducted Pearson correlation tests, separately in each group (DCD and TD), for each localization task (proprioceptive and tactile) and each effector (manual and ocular), to quantify the relationship between the standard scores in each MABC-2 subtest separately and the localization performance (total localization error). We also conducted correlation tests between the localization performance and the attentional abilities (the score of the French version of the Conners' Parent Rating Scale). In total, we performed 4 correlation tests per task and effector; we applied FDR correction for multiple correlations.

To understand to what extent proprioceptive and tactile deficits in DCD children are linked to visuo-spatial performance, we performed Pearson correlation tests only in the DCD group between visuo-spatial (i.e. the score of the EVSP test) and localization performance (i.e. the total distance of localization error, separately for each localization task -proprioceptive and tactile- and each effector -manual and ocular).

3. Results

3.1. Proprioceptive localization task

3.1.1. Horizontal error

The DCD group showed a significantly larger localization error (group mean = $-5.24\text{cm} \pm 3.38$) than the TD group (group mean = $-2.00\text{cm} \pm 3.16$) (figure 3), as shown by the main effect of the *Group* ($F(1) = 8.025, p = 0.008$). Negative values on the horizontal axis indicate proximal localization errors (i.e., responses erred toward the elbow).

We also observed a significant interaction between the *Effector* and the *Target position* ($F(1) = 9.890, p = 0.004$). Post hoc comparisons revealed a larger horizontal error for the *Target position* of 10° as compared to 30° for the ocular response (group mean at $10^\circ = -5.38\text{cm} \pm 4.87$; group mean at $30^\circ = -3.72\text{cm} \pm 3.56$; $t = -2.999, p = 0.006$), but not for the manual response (group mean at $10^\circ = -2.83\text{cm} \pm 5.37$; group mean at $30^\circ = -2.79\text{cm} \pm 4.60$; $t = -0.068, p = 0.946$), as well as a larger horizontal error for the ocular response as compared to the manual response for the *Target position* of 10° ($t = 2.639, p = 0.014$) but not of 30° ($t = 1.001, p = 0.325$).

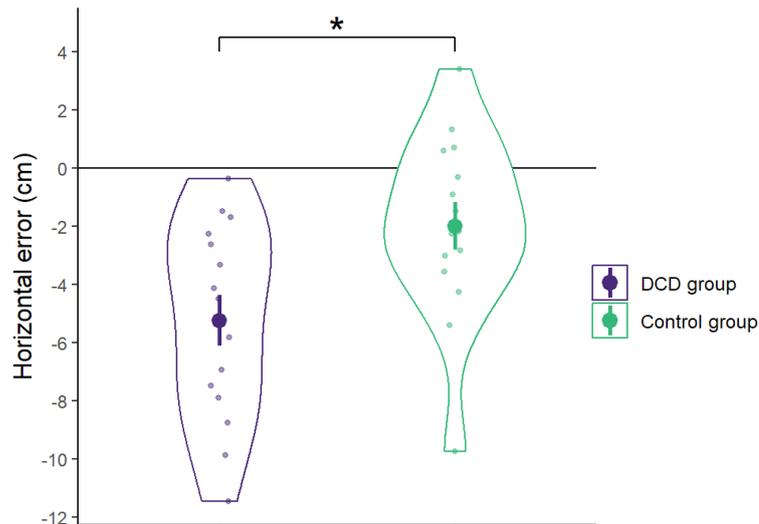


Figure 3. Horizontal error in the proprioceptive localization task, as a function of the group. Negative values indicate proximal horizontal errors. Performance of the DCD group is shown in purple, that of TD children in green. Small dots indicate individual data. Larger dots indicate the mean localization error, vertical lines represent the SEM. The width of curve corresponds to the density distribution of the data. Asterisk indicates significance ($p < 0.05$)

3.1.2. Vertical error

The DCD group displayed larger errors (group mean = $5.68\text{cm} \pm 2.97$) than the TD group (group mean = $3.74\text{cm} \pm 1.63$), as revealed by the main effect of the *Group* ($F(1) = 4.632, p = 0.040$) (Figure 4). Positive values on the vertical axis indicate upward errors (i.e. responses overestimated the elbow flexion).

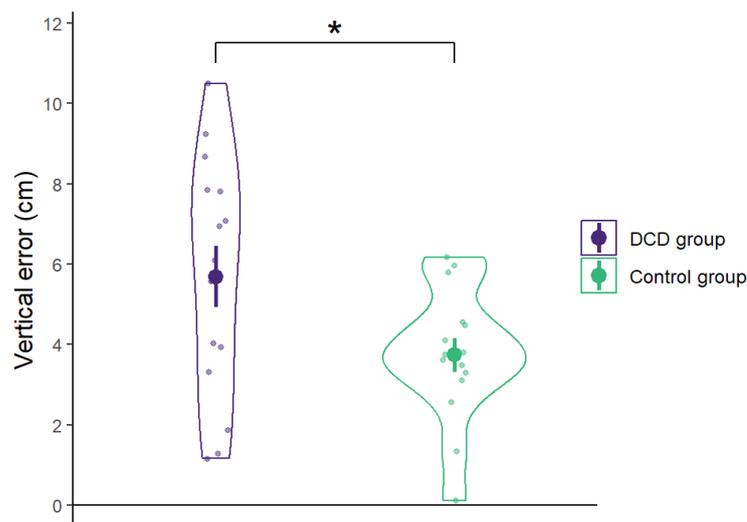


Figure 4. Vertical error in the proprioceptive localization task, as a function of the group. Errors were larger for the DCD group as compared to the TD group. Positive values indicate upward errors. Same conventions as in Figure 3

In addition, we observed larger error for the 10° position (group mean = 7.02cm ± 3.13) as compared to 30° position (group mean = 2.38cm ± 2.73), the *Target position* main effect being significant ($F(1) = 88.505, p < 0.001$)

The LMM also revealed a significant interaction between the *Effector* and the *Target position* ($F(1) = 11.672, p = 0.002$) (Figure 5). Post hoc comparisons indicated that the vertical error was larger for the *Target position* of 10° as compared to 30° for both the manual (10°: 6.96cm ± 3.36; 30°: 3.31cm ± 3.08) and the ocular *Effectors* (10°: 7.24 ± 3.59; 30°: 0.90cm ± 3.80) ($t = 7.776$ and 7.868 respectively, $p < 0.001$). However, the vertical error was larger for the manual response as compared to the ocular response at 30° ($t = 2.926, p = 0.007$) and not at 10° ($t = -0.484, p = 0.632$).

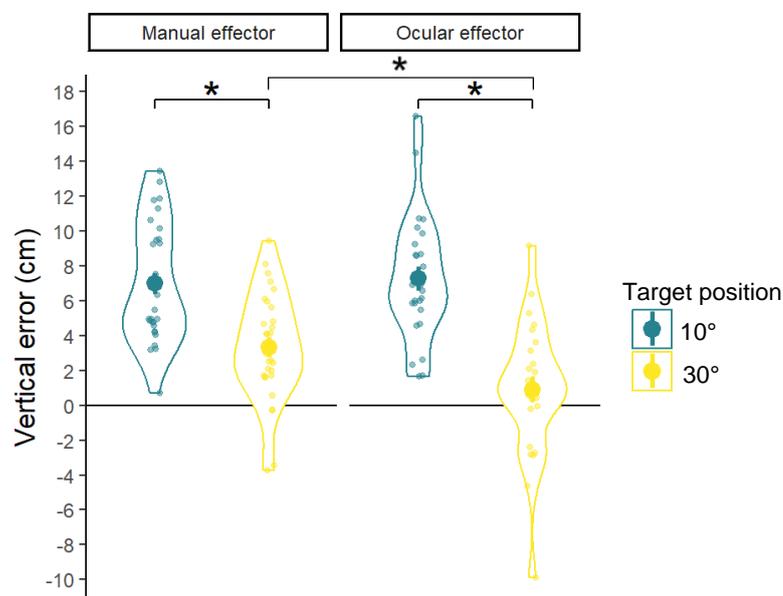


Figure 5. Vertical error in the proprioceptive localization task, as a function of the effector and the target position. Same conventions as in Figure 3

3.2. Tactile localization task

3.2.1. Horizontal error

The horizontal error was significantly larger for the DCD group (group mean = -6.07cm ± 2.99) as compared to the TD group (group mean = -3.90cm ± 3.81), as revealed by the main effect of the *Group* ($F(1) = 4.289, p = 0.047$). The horizontal error was also affected by the *Encoding duration* ($F(1) = 6.096, p = 0.014$).

We also observed a significant interaction between the *Group*, the *Target position* and the *Encoding duration* ($F(1) = 6.087, p = 0.014$) (Figure 6). Post hoc comparisons showed that the horizontal error was larger in the DCD group as compared to the TD group when the index finger was stimulated with a short vibration ($t = -2.367, p = 0.025$), and when the thumb was stimulated with a long vibration ($t = -2.071, p = 0.047$). The difference between groups was not significant for the other conditions (index finger and long vibration : $t = -1.696, p = 0.100$; thumb and short vibration : $t = -1.874, p = 0.071$). Post hoc also revealed a larger error for the short encoding duration as compared to the long one only in the DCD group and for the index finger ($t = -3.906, p < 0.001$). Finally, the error was larger when the stimulation was applied on the index finger as compared to the thumb only in the DCD group and for the short encoding duration ($t = -2.069, p = 0.045$).

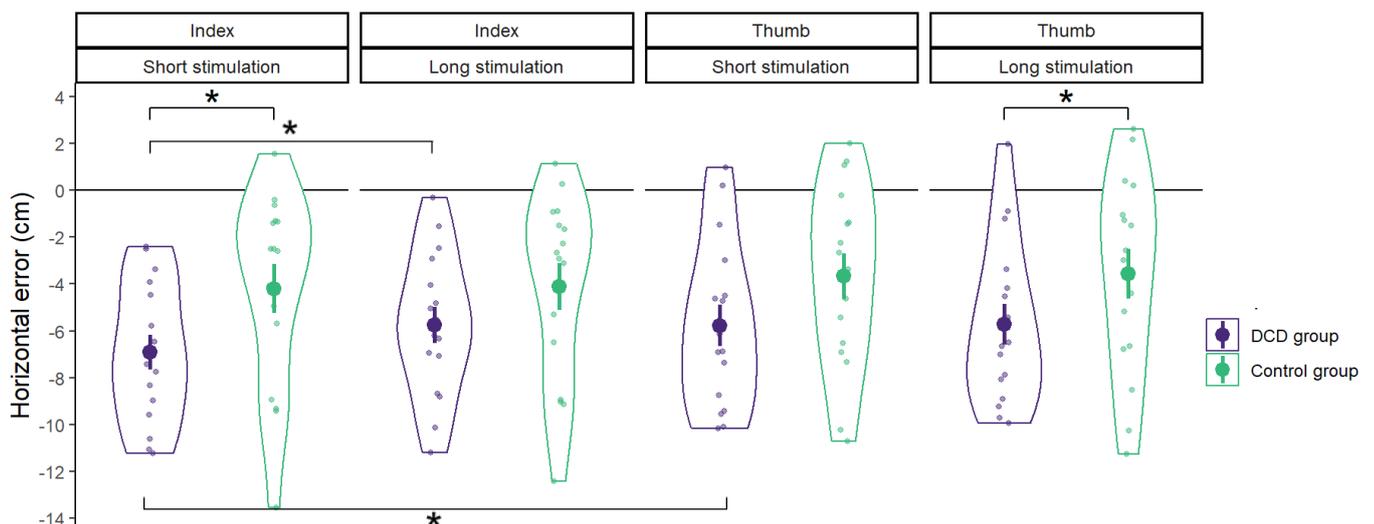


Figure 6. Horizontal error in the tactile localization task, as a function of the group, the target position and the encoding duration. Errors were larger in the DCD group as compared to the TD group when a short stimulation was applied on the index finger and when a longer one was applied on the thumb. In the DCD group, errors were larger when the index finger received a short vibration as compared to a longer one. Same conventions as in Figure 3

3.2.2. Vertical error

The vertical error was larger when the index finger (group mean = $-3.16 \text{ cm} \pm 3.80$) was stimulated as compared to the thumb (group mean = $-1.81 \text{ cm} \pm 3.74$), as revealed by the significant effect of the *Target position* ($F(1) = 10.895, p = 0.003$) (Figure 7).

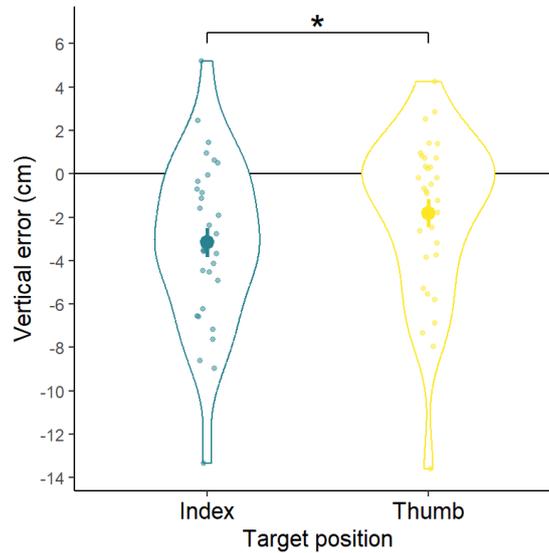


Figure 7. Vertical error in the tactile localization task, as a function of the target position. Errors were larger when the index finger was stimulated as compared to the thumb. Same conventions as in Figure 3

We also observed a significant effect of the *Effector* ($F(1) = 17.357, p < 0.001$), of the *Encoding duration* ($F(1) = 6.427, p = 0.011$) and a triple interaction involving these two factors and the *Group* ($F(1) = 6.112, p = 0.014$) (Figure 8). Post hoc comparisons revealed that the ocular response leads to a larger vertical error as compared to the manual response in all conditions (consistent with the *Effector* main effect) (all $p < 0.02$). There was no difference between the two groups (all $p > 0.44$). Finally, we observed a larger vertical error for the long encoding duration (group mean = $-6.22 \text{ cm} \pm 6.17$) as compared to the short one (group mean = $-5.30 \text{ cm} \pm 6.12$) only in the DCD group and for the ocular response ($t = 3.933, p < 0.001$).

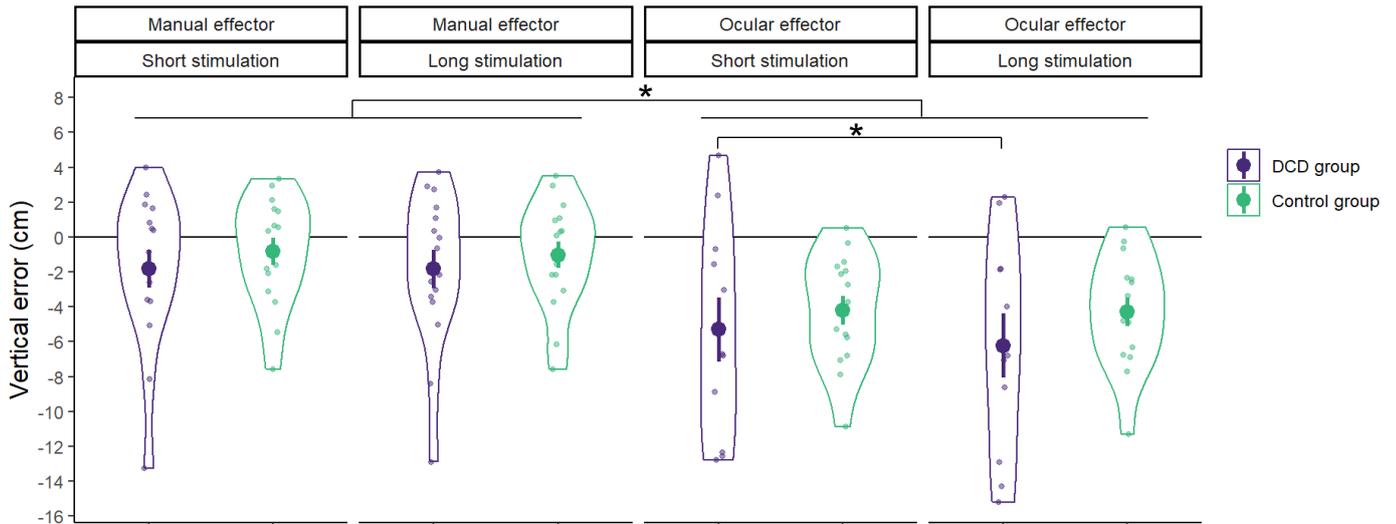


Figure 8. Vertical errors in the tactile localization task, as a function of the group, the effector and the encoding duration. Ocular errors were larger as compared to manual errors. In the DCD group, ocular errors were larger when a long vibration was applied as compared to a shorter one. Same conventions as in Figure 3

3.3. Complementary assessments

Tactile detection and discrimination thresholds

We did not observe any significant difference between groups for either the tactile detection threshold ($t(26.94) = 0.67, p = 0.51$), or the tactile discrimination threshold ($t(27.00) = 0.17, p = 0.86$).

Visuospatial abilities (EVSP)

The DCD group obtained a significantly lower EVSP score (group mean = 59.65 ± 5.31) than the TD group (group mean = 66.63 ± 2.5), revealing lower visuospatial performance ($t(23.05) = -4.87, p < 0.001$). In the DCD group, 7 participants scored in the ‘at risk’ category (from the normative data established by Pisella et al. (2020)); the other 10 participants performed within the norms for their age. In the TD group, all participants scored within the norms.

Proprioceptive matching tasks

The DCD group showed a significantly larger relative matching error (group mean = $3.3^\circ \pm 3.5$) as compared to the TD group (group mean = $1.1^\circ \pm 1.8$), as shown by the main effect of the *Group* ($F(1) = 5.732, p = 0.023$) (Figure 9). Positive values of matching error indicate that responses overshoot the target, i.e. overestimate the elbow flexion.

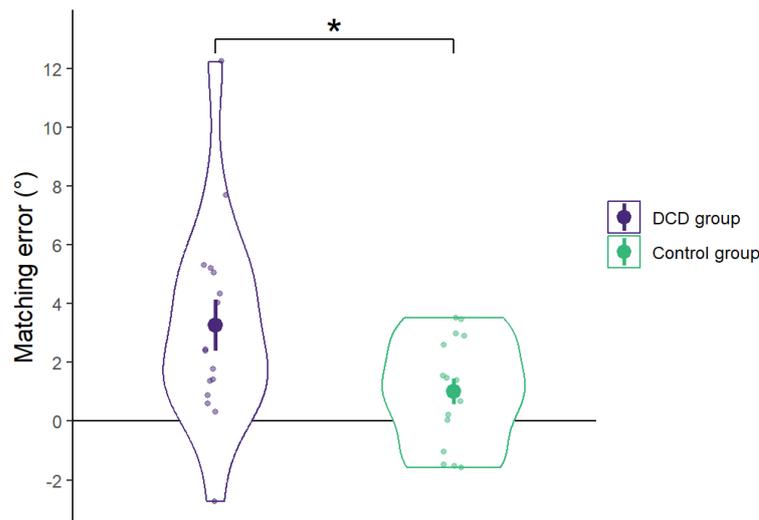


Figure 9. Angular errors in the proprioceptive matching tasks, as a function of the group. DCD group showed larger matching errors as compared to the TD group. Positive values indicate an overshoot of the target, i.e. too much elbow flexion. Same convention as in Figure 3

An effect of the *Matching type* was also observed ($F(2) = 18.943, p < 0.001$). Post hoc comparisons revealed that the error in the contralateral task (group mean = $-0.2^\circ \pm 3.8$) was smaller than in both ipsilateral tasks (group mean for ipsilateral dominant task = $3.1^\circ \pm 3.2$; group mean for ipsilateral non-dominant task = $3.5^\circ \pm 3.7$; $p < 0.001$), which did not differ between them ($t(38.9) = -0.850, p = 0.675$).

Finally, the analysis showed an effect of the *Target position* ($F(1) = 11.661, p = 0.002$), with the error for the 10° target (group mean = $3.0^\circ \pm 2.2$) being larger than for the 30° target position (group mean = $1.3^\circ \pm 4.1$).

Gesture imitation proficiency

The DCD group performed significantly worse in gestures imitation (group mean = 53.65 ± 11.84) than the TD group (group mean = 65.56 ± 3.63) ($t(19.16) = -3.96, p = 0.001$).

Manual dexterity performance

The DCD group was slower (group mean = $25.3 \text{ sec} \pm 5.6$) than the TD group (group mean = $20.4 \text{ sec} \pm 2.8$), as disclosed by a significant main effect of the *Group* in the LMM ($F(1) = 12.370, p = 0.001$).

We also observed a faster performance for the dominant hand (group mean = $21.9 \text{ sec} \pm 4.4$) as compared to the non-dominant hand (group mean = $24.0 \text{ sec} \pm 5.6$), as revealed by a main effect of the *Hand* ($F(1) = 11.443, p = 0.002$).

Attentional abilities

The Conners' Parent Rating Scale score revealed significant lower attentional abilities in DCD (group mean = 36.1 ± 17.8) as compared to TD children (group mean = 18.1 ± 14.3) ($t(29.00) = 3.12, p = 0.004$).

3.4. Correlations in the DCD group

3.4.1. Between localization errors and MABC-2 sub-scores

Proprioceptive localization error

The ocular error was negatively correlated with the Aiming and Catching sub-score ($r = -0.76, p = 0.008$) and with the Balance sub-score ($r = -0.58, p = 0.047$) (Figure 10a and 10b respectively), indicating that the larger the ocular errors, the poorer the motor performance in these domains. However, the ocular error did not correlate with the Manual Dexterity sub-score ($r = -0.26, p = 0.27$).

The manual error correlated with the score of Manual Dexterity ($r = -0.47, uncorrected p = 0.037$) but this correlation did not survive to the FDR correction ($corrected p = 0.11$) (Figure 10c). The manual error was not correlated with the Aiming and Catching and the Balance sub-scores ($r = -0.03, p = 0.45; r = -0.43, p = 0.11$ respectively).

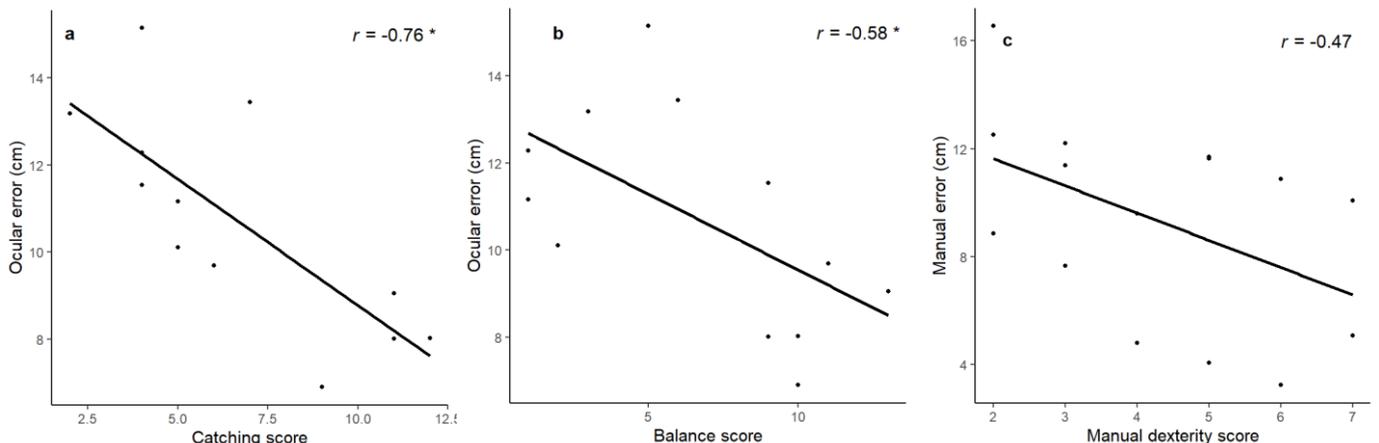


Figure 10. Correlations in the DCD group, between errors in the proprioceptive task and motor performance assessed by the MABC-2: a. between ocular errors and Aiming and catching sub-score; b. between ocular errors and Balance sub-score; c. between manual errors and Manual dexterity sub-score (non-significant with the corrected p-value). Each dot represents individual mean performance. Asterisks indicate significance ($p < 0.05$)

Tactile localization error

We did not observe any significant correlation between the ocular or manual error and the MABC-2 sub-scores (all $p \geq 0.44$).

3.4.2. Correlations between localization errors and visuospatial abilities

Proprioceptive localization error

We did not observe a significant correlation between visuospatial abilities of the DCD group and the ocular error ($r = -0.14$, $p = 0.65$). However, visuospatial abilities were negatively correlated with the manual error in the DCD group ($r = -0.79$, $p < 0.001$) (Figure 11).

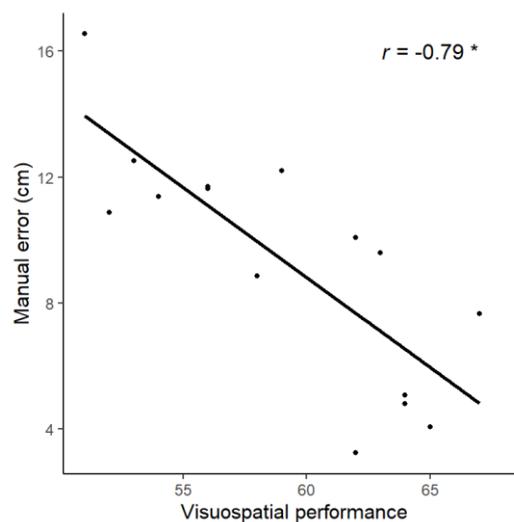


Figure 11. Significant correlation in the DCD group between the manual errors in the proprioceptive localization task and the visuospatial performance

Tactile localization error

In the DCD group, visuospatial abilities did not correlate with the ocular error ($r = 0.38$, $p = 0.24$), nor with the manual error ($r = 0.11$, $p = 0.69$).

3.5. Correlations between localization errors and MABC-2 sub-scores in the TD group

Proprioceptive localization error

The negative correlation between the manual error and the Balance sub-score indicated that the smaller the localization error, the greater the balance performance ($r = -0.59$, $p = 0.040$). We did not observe any correlation between the manual error and the other MABC-2 sub-scores (all $p \geq 0.47$), nor between the ocular error and the three MABC-2 sub-scores (all $p > 0.21$).

Tactile localization error

The ocular error negatively correlated with the Balance sub-score, indicating that the smaller the localization error, the greater the balance performance ($r = -0.62$, $p = 0.028$). However, the ocular error did not correlate with the Manual Dexterity or the Aiming and Catching sub-scores (all $p \geq 0.42$). The manual error was not correlated with the different scores (all $p \geq 0.30$).

3.6. Correlations between localization errors and attentional score

We did not observe any significant correlation between the attentional score (i.e. the score of the French version of the Conners' Parent Rating Scale) and the localization errors (neither for the proprioceptive task nor for the tactile task) in either group (all $p > 0.19$).

4. Discussion

In this study, we assessed proprioceptive and tactile abilities in children with DCD, through somatosensory targets localization tasks, by using two different effectors, namely a manual pointing and an ocular saccade. We also investigated the link between these possible somatosensory deficits and motor difficulties. First, in addition to the DSM-5 criteria for DCD, we confirmed the presence of motor difficulties in our population of children with DCD: performance in manual dexterity was slower in children with DCD than in TD children and imitation gesture proficiency was impaired. Moreover, we observed an inaccuracy in children with DCD as compared to TD children for localizing proprioceptive targets with both effectors. An inaccuracy in children with DCD was also revealed in the tactile localization task, but only along the horizontal axis and under certain conditions (*i.e.* when the tactile stimulation was applied on the index finger for a short duration or when it was applied on the thumb for a longer duration). Proprioceptive performance was correlated with motor performance in balance and in aiming and catching domains in children with DCD. However, no correlation was revealed between tactile localization performance and motor difficulties in this population.

Proprioceptive deficits in children with DCD

Children with DCD were less accurate than TD children to localize proprioceptive targets, regardless of the effector, the target position and the encoding duration. Thus, even when using an effector unaffected by motor disturbance such as the ocular saccade, children with DCD showed lower localization performance than TD children. This deficit was revealed along both axes (horizontal and vertical). The localization error in the horizontal dimension corresponds

to the estimation of the distance between the target and the body/chest, possibly reflecting the representation of the length of the forearm. In the configuration of our set-up, the error along the vertical axis may reflect the estimation of the angle of elbow flexion. Larger errors in children with DCD occurring in both dimensions may suggest that both the representation of the upper limb length and the angular position of the elbow were disturbed in this population. Thus, proprioceptive acuity seems altered in children with DCD. This result is consistent with previous studies which suggested a proprioceptive deficit, although they involved a (possibly inaccurate) motor response (Loftesnes et al., 2017; M. A. Mon-Williams et al., 1999; Smyth & Mason, 1998; Tseng et al., 2018; Tseng, Tsai, et al., 2019) or a (possibly altered) working memory (Chen et al., 2020; Tseng et al., 2018). Here, by avoiding these two (motor and memory) confounding factors, we confirmed the presence of a proprioceptive deficit in children with DCD, affecting the accuracy (and not only the precision as in Tseng et al., 2017, 2018). Furthermore, despite the involvement of an upper limb motor response, proprioceptive matching tasks also argue for a deficit, given the difference in accuracy between the two groups. In this proprioceptive localization task, we manipulated the encoding duration, which corresponds to the duration in static position before the participant's response, but did not observe any effect on the performance. Thus, increasing the time available to process proprioceptive information did not lead to an improvement in localization accuracy, even in the DCD group. Therefore, we suggest that the proprioceptive deficit in DCD results from inaccurate sensory information rather than from a slowdown of sensory processing.

Tactile deficits were less prominent

First, no tactile localization task deficits were found in children with DCD along the vertical axis. Second, the difference in horizontal accuracy between the two groups appeared only in certain conditions, namely when a short vibration was applied on the index finger and when a longer vibration was applied on the thumb (no significant difference in the other conditions). Children with DCD seemed particularly impaired at localizing a stimulation on the index finger, which appears to be the most complex condition according to our previous data in healthy adults showing a lower accuracy as compared to the thumb (Naffrechoux et al., 2024). This condition might be more sensitive and could have highlighted in children with DCD a subtle deficit which disappeared when the amount of tactile information increased (longer vibration). A beneficial effect of stimulation duration on localization performance may imply that the processing of tactile information is slowed down in children with DCD, as suggested by the results of previous studies (Nobusako et al., 2021; O'Brien et al., 2008). And third, regarding elementary tactile

abilities, we confirmed that the tactile detection and discrimination thresholds were not affected in children with DCD, consistent with previous studies (Cox et al., 2015; Law et al., 2011).

Regarding the vertical error, even if there was no difference between the two groups, we observed larger errors for the long vibration as compared to the shorter one, for the saccadic response in the DCD group. This result is surprising and unexpected. The only explanation we can think of is that the DCD group is more disturbed by the auditory information from the decoy vibrator (placed on the table) than the control group, leading to a more downward response, a bias which could be stronger as the vibration duration and the associated sound increased.

Proprioceptive but not tactile deficits linked to the motor performance

Interestingly, in the DCD group, the proprioceptive localization errors assessed with the ocular effector (supposed to be unaffected by a motor deficit) correlated with motor performance in balance and aiming/catching domains, but not in manual dexterity. Therefore, proprioceptive deficits, assessed without motor confounding factor, seem to be related to the severity of the gross motor impairments, but not (or in a lesser extent) of fine motor impairments. Chen et al. (2020) already described this link between balance performance and proprioception in children with DCD, by focusing on the lower limb's proprioception. It is known that ankle proprioceptive acuity is related to balance control in healthy and older adults (Asghari et al., 2024; Caudron et al., 2010; Chen & Qu, 2019; Deshpande et al., 2016; Ko et al., 2016), in stroke patients (Cho & Kim, 2021) and also in athletes (Han et al., 2015). Complementing the result of Chen et al. (2020) in children with DCD, our study showed that the proprioceptive acuity of the upper limb also predicts the balance performance. This could be explained by a global proprioceptive deficit, affecting the whole body in children with DCD. Furthermore, we also observed a correlation between proprioceptive acuity and aiming/catching performance in children with DCD, that is the larger the proprioceptive errors, the more severe the aiming and catching difficulties. In this motor domain, if visual information is particularly important to encode the target position, reliable proprioceptive information seems necessary to complete the task efficiently, perhaps by controlling the limb trajectory. Regarding the manual dexterity, the performance does not seem related to the proprioceptive acuity, consistent with the findings of Chen and colleagues (2020). Manual dexterity abilities, and particularly those assessed in the MABC-2 sub-test, could depend more on visual control than on proprioceptive information. By the way, Pisella et al. (2021) showed a correlation between visuospatial deficit and manual dexterity difficulties in children with DCD.

In contrast to the proprioception, tactile localization performance does not predict the severity of motor difficulties in children with DCD, whatever the domain. This finding reinforces our conclusion that tactile perception deficits do not predominate in DCD.

Since we observed lower attentional abilities in children with DCD as compared to TD children, this could suggest that the poor localization performance of somatosensory targets is caused by attentional deficits. However, no localization performance (tactile or proprioceptive, with both effectors) was correlated with attentional abilities, either in the DCD group or in the control group. Therefore, deficits highlighted in the localization tasks may not be explained by an attentional deficit, even if it is more frequent in children with DCD.

Taken together, these findings demonstrate a proprioceptive deficit in children with DCD, which predicts the severity of difficulties in certain motor domains. This suggests that proprioceptive deficits play a role in some of the difficulties experienced by patients with DCD. Taking into account this new knowledge could help improve the effectiveness of interventions for DCD.

Body representations impaired in children with DCD?

Horizontal localization errors occurred, in both tasks (proprioceptive and tactile) in the proximal direction, namely toward the elbow. While our paradigm, measuring an absolute localization of only one landmark per finger, cannot assess the representation of hand metrics, the proximal bias, consistent with our previous results in healthy adults (Naffrechoux et al., 2024), may reflect the well documented distortions of body representation (Longo, 2022; Longo & Haggard, 2010; Matsumiya, 2022), namely an underestimation of the length of the forearm or hand. Since we observed a larger horizontal bias in children with DCD as compared to TD children in both tasks, one could assume that body representations are altered in children with DCD. Indeed, an alteration in body representations has already been suggested, possibly involving both an imprecision (Gauduel et al., 2024) or an impaired plasticity (Martel et al., 2022) of body representations.

Effect of target position on the localization accuracy

Localization tasks revealed an effect of the target position in both tasks, already reported in our previous study in healthy adults (Naffrechoux et al., 2024): larger vertical errors were observed for responses to the target position of 10° of elbow flexion from the initial position, as compared to the 30° target position. Interestingly, we also observed larger errors at 10° as compared to 30° in the proprioceptive matching task, whatever the sub-task (*i.e.* ipsilateral or

contralateral). Regarding the tactile localization task, larger vertical errors were revealed when the tactile stimulus was applied on the index finger as compared to the thumb, also consistent with our previous results (Naffrechoux et al., 2024) and with the pattern of body representation distortions (i.e. distortions affect the index finger more than the other fingers (Longo, 2017; Longo & Haggard, 2010)).

Conclusion

We highlighted proprioceptive deficits in children with DCD, as revealed by an inaccuracy in localizing proprioceptive targets. These deficits appear to predict motor difficulties, mainly in balance and ball throwing/catching. Regarding spatial tactile perception, deficits appeared to be lighter, mainly affecting the horizontal error (possibly reflecting a distortion of body representation).

References

- Adams, I. L. J., Ferguson, G. D., Lust, J. M., Steenbergen, B., & Smits-Engelsman, B. C. M. (2016). Action planning and position sense in children with Developmental Coordination Disorder. *Human Movement Science*, 46, 196-208.
<https://doi.org/10.1016/j.humov.2016.01.006>
- Adams, I. L. J., Lust, J. M., Wilson, P. H., & Steenbergen, B. (2014). Compromised motor control in children with DCD : A deficit in the internal model?—A systematic review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 47, 225-244.
<https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2014.08.011>
- Adams, I. L. J., Lust, J. M., Wilson, P. H., & Steenbergen, B. (2017). Testing predictive control of movement in children with developmental coordination disorder using converging operations. *British Journal of Psychology*, 108(1), 73-90. <https://doi.org/10.1111/bjop.12183>
- American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders (DSM-5®)* (5th edition). American Psychiatric Publishing.
- Asghari, M., Elali, K., Sullivan, A., LaFleur, B., Madigan, M. L., & Toosizadeh, N. (2024). Assessing the role of ankle and hip joint proprioceptive information in balance recovery using vibratory stimulation. *Heliyon*, 10(4), e25979. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25979>

- Assaiante, C., Barlaam, F., Cignetti, F., & Vaugoyeau, M. (2014). Body schema building during childhood and adolescence : A neurosensory approach. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, 44(1), 3-12. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2013.10.125>
- Bahmad, S., Miller, L. E., Pham, M. T., Moreau, R., Salemme, R., Koun, E., Farnè, A., & Roy, A. C. (2020). Online proprioception feeds plasticity of arm representation following tool-use in healthy aging. *Scientific Reports*, 10(1), 17275. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74455-5>
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1). <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Blank, R., Barnett, A. L., Cairney, J., Green, D., Kirby, A., Polatajko, H., Rosenblum, S., Smits-Engelsman, B., Sugden, D., Wilson, P., & Vinçon, S. (2019). International clinical practice recommendations on the definition, diagnosis, assessment, intervention, and psychosocial aspects of developmental coordination disorder. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 61(3), 242-285. <https://doi.org/10.1111/dmcn.14132>
- Carskadon, M. A., & Acebo, C. (1993). A self-administered rating scale for pubertal development. *The Journal of Adolescent Health: Official Publication of the Society for Adolescent Medicine*, 14(3), 190-195. [https://doi.org/10.1016/1054-139x\(93\)90004-9](https://doi.org/10.1016/1054-139x(93)90004-9)
- Caudron, S., Nougier, V., & Guerraz, M. (2010). Postural challenge and adaptation to vibration-induced disturbances. *Experimental Brain Research*, 202(4), 935-941. <https://doi.org/10.1007/s00221-010-2194-6>
- Chen, F., Pan, C., Chu, C., Tsai, C., & Tseng, Y. (2020). Joint position sense of lower extremities is impaired and correlated with balance function in children with developmental coordination disorder. *Journal of Rehabilitation Medicine*, 52(8), jrm00088. <https://doi.org/10.2340/16501977-2720>
- Chen, X., & Qu, X. (2019). Age-Related Differences in the Relationships Between Lower-Limb Joint Proprioception and Postural Balance. *Human Factors*, 61(5), 702-711. <https://doi.org/10.1177/0018720818795064>
- Cho, J.-E., & Kim, H. (2021). Ankle Proprioception Deficit Is the Strongest Factor Predicting Balance Impairment in Patients With Chronic Stroke. *Archives of Rehabilitation Research and Clinical Translation*, 3(4). <https://doi.org/10.1016/j.arrct.2021.100165>

- Cignetti, F., Caudron, S., Vaugoyeau, M., & Assaiante, C. (2013). Body Schema Disturbance in Adolescence : From Proprioceptive Integration to the Perception of Human Movement. *Journal of Motor Learning and Development*, 1(3), 49-58. <https://doi.org/10.1123/jmld.1.3.49>
- Coleman, R., Piek, J. P., & Livesey, D. J. (2001). A longitudinal study of motor ability and kinaesthetic acuity in young children at risk of developmental coordination disorder. *Human Movement Science*, 20(1-2), 95-110. [https://doi.org/10.1016/S0167-9457\(01\)00030-6](https://doi.org/10.1016/S0167-9457(01)00030-6)
- Cox, L. E., Harris, E. C., Auld, M. L., & Johnston, L. M. (2015). Impact of tactile function on upper limb motor function in children with Developmental Coordination Disorder. *Research in Developmental Disabilities*, 45-46, 373-383. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2015.07.034>
- De Renzi, E., Motti, F., & Nichelli, P. (1980). Imitating gestures. A quantitative approach to ideomotor apraxia. *Archives of Neurology*, 37(1), 6-10. <https://doi.org/10.1001/archneur.1980.00500500036003>
- Deshpande, N., Simonsick, E., Metter, E. J., Ko, S., Ferrucci, L., & Studenski, S. (2016). Ankle proprioceptive acuity is associated with objective as well as self-report measures of balance, mobility, and physical function. *Age (Dordrecht, Netherlands)*, 38(3), 53. <https://doi.org/10.1007/s11357-016-9918-x>
- Edin, B. B., Westling, G., & Johansson, R. S. (1992). Independent control of human finger-tip forces at individual digits during precision lifting. *The Journal of Physiology*, 450, 547-564. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1992.sp019142>
- Elbasan, B., Kayıhan, H., & Duzgun, I. (2012). Sensory integration and activities of daily living in children with developmental coordination disorder. *Italian Journal of Pediatrics*, 38(1), 14. <https://doi.org/10.1186/1824-7288-38-14>
- Forgaard, C. J., Reschechtko, S., Gribble, P. L., & Pruszynski, J. A. (2021). Skin and muscle receptors shape coordinated fast feedback responses in the upper limb. *Current Opinion in Physiology*, 20, 198-205. <https://doi.org/10.1016/j.cophys.2021.02.001>
- Fumeaux, P., Mercier, C., Roche, S., Iwaz, J., Stéphan, P., & Revol, O. (2021). Validation of the French Version of Conners' Parent Rating Scale–Revised, Short Form in ADHD-Diagnosed Children and Comparison With Control Children. *Journal of Attention Disorders*, 25(1), 124-133. <https://doi.org/10.1177/1087054718763908>
- Fumeaux, P., Roche, S., Mercier, C., Iwaz, J., Bader, M., Stéphan, P., Écochard, R., & Revol, O. (2020). Validation of the French Version of Conners' Parent Rating Scale–Revised, Short

- Version (CPRS-R:S) : Scale Measurement Invariance by Sex and Age. *Journal of Attention Disorders*, 24(12), 1693-1700. <https://doi.org/10.1177/1087054717696767>
- Gauduel, T., Blondet, C., Gonzalez-Monge, S., Bonaiuto, J., & Gomez, A. (2024). Alteration of body representation in typical and atypical motor development. *Developmental Science*, 27(3), e13455. <https://doi.org/10.1111/desc.13455>
- Gentilucci, M., Toni, I., Daprati, E., & Gangitano, M. (1997). Tactile input of the hand and the control of reaching to grasp movements. *Experimental Brain Research*, 114(1), 130-137. <https://doi.org/10.1007/pl00005612>
- Gomez, A., & Sirigu, A. (2015). Developmental coordination disorder : Core sensori-motor deficits, neurobiology and etiology. *Neuropsychologia*, 79, 272-287. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.09.032>
- Gras, D., Ploix Maes, E., Doulazmi, M., Huron, C., Galléa, C., Boespflug Tanguy, O., Germanaud, D., & Roze, E. (2023). Developmental coordination disorder subtypes in children : An unsupervised clustering. *Developmental Medicine & Child Neurology*, dmcn.15563. <https://doi.org/10.1111/dmcn.15563>
- Hallett, P. E., & Lightstone, A. D. (1976). Saccadic eye movements to flashed targets. *Vision Research*, 16(1), 107-114. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(76\)90084-5](https://doi.org/10.1016/0042-6989(76)90084-5)
- Han, J., Anson, J., Waddington, G., Adams, R., & Liu, Y. (2015). The Role of Ankle Proprioception for Balance Control in relation to Sports Performance and Injury. *BioMed Research International*, 2015, 842804. <https://doi.org/10.1155/2015/842804>
- Hepp-Reymond, M.-C., Chakarov, V., Schulte-Mönting, J., Huethe, F., & Kristeva, R. (2009). Role of proprioception and vision in handwriting. *Brain Research Bulletin*, 79(6), 365-370. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2009.05.013>
- Hothorn, T., Bretz, F., & Westfall, P. (2008). Simultaneous inference in general parametric models. *Biometrical Journal. Biometrische Zeitschrift*, 50(3), 346-363. <https://doi.org/10.1002/bimj.200810425>
- Hyde, C., & Wilson, P. (2011a). Online motor control in children with developmental coordination disorder : Chronometric analysis of double-step reaching performance: Online motor control in children with developmental coordination disorder. *Child: Care, Health and Development*, 37(1), 111-122. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2214.2010.01131.x>

- Hyde, C., & Wilson, P. H. (2011b). Dissecting online control in Developmental Coordination Disorder : A kinematic analysis of double-step reaching. *Brain and Cognition*, 75(3), 232-241. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2010.12.004>
- Jeannerod, M., Michel, F., & Prablanc, C. (1984). The control of hand movements in a case of hemianaesthesia following a parietal lesion. *Brain: A Journal of Neurology*, 107 (Pt 3), 899-920. <https://doi.org/10.1093/brain/107.3.899>
- Johansson, R. S. (2002). Dynamic use of tactile afferent signals in control of dexterous manipulation. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 508, 397-410. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0713-0_45
- Johnston, J. S., Begum Ali, J., Hill, E. L., & Bremner, A. J. (2017). Tactile localization performance in children with developmental coordination disorder (DCD) corresponds to their motor skill and not their cognitive ability. *Human Movement Science*, 53, 72-83. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2016.12.008>
- Kagerer, F. A., Bo, J., Contreras-Vidal, J. L., & Clark, J. E. (2004). Visuomotor Adaptation in Children with Developmental Coordination Disorder. *Motor Control*, 8(4), 450-460. <https://doi.org/10.1123/mcj.8.4.450>
- Kagerer, F. A., Contreras-Vidal, J. L., Bo, J., & Clark, J. E. (2006). Abrupt, but not gradual visuomotor distortion facilitates adaptation in children with developmental coordination disorder. *Human Movement Science*, 12.
- Katschmarsky, S., Cairney, S., Maruff, P., Wilson, P. H., & Currie, J. (2001). The ability to execute saccades on the basis of efference copy : Impairments in double-step saccade performance in children with developmental co-ordination disorder. *Experimental Brain Research*, 136(1), 73-78. <https://doi.org/10.1007/s002210000535>
- Ko, S.-U., Simonsick, E. M., Deshpande, N., Studenski, S., & Ferrucci, L. (2016). Ankle Proprioception-Associated Gait Patterns in Older Adults : Results from the Baltimore Longitudinal Study of Aging. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 48(11). <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001017>
- Kuznetsova, A., Brockhoff, P. B., & Christensen, R. H. B. (2017). lmerTest Package : Tests in Linear Mixed Effects Models. *Journal of Statistical Software*, 82, 1-26. <https://doi.org/10.18637/jss.v082.i13>

- Law, S.-H., Lo, S. K., Chow, S., & Cheing, G. L. Y. (2011). Grip force control is dependent on task constraints in children with and without developmental coordination disorder: *International Journal of Rehabilitation Research*, 34(2), 93-99.
<https://doi.org/10.1097/MRR.0b013e32833f0519>
- Li, K., Su, W., Fu, H., & Pickett, K. A. (2015). Kinesthetic deficit in children with developmental coordination disorder. *Research in Developmental Disabilities*, 38, 125-133.
<https://doi.org/10.1016/j.ridd.2014.12.013>
- Loftesnes, J. M., Ingvaldsen, R. P., & Sigmundsson, H. (2017). Children With Developmental Coordination Disorder : Can Underlying Perceptual Disability be Remediated Through Specific Training? *Psychological Reports*, 120(2), 242-254.
<https://doi.org/10.1177/0033294116687761>
- Longo, M. R. (2017). Expansion of Perceptual Body Maps Near – But Not Across – The Wrist. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00111>
- Longo, M. R. (2022). Distortion of mental body representations. *Trends in Cognitive Sciences*, 26(3), 241-254. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2021.11.005>
- Longo, M. R., & Haggard, P. (2010). An implicit body representation underlying human position sense. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(26), 11727-11732.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1003483107>
- Lust, J. M., Steenbergen, B., Diepstraten, J. (Ankie) E. M., Wilson, P. H., Schoemaker, M. M., & Poelma, M. J. (2022). The subtypes of developmental coordination disorder. *Developmental Medicine & Child Neurology*, dmcn.15260.
<https://doi.org/10.1111/dmcn.15260>
- Martel, M., Boulenger, V., Koun, E., Finos, L., Farnè, A., & Roy, A. C. (2022). Body schema plasticity is altered in Developmental Coordination Disorder. *Neuropsychologia*, 166, 108136.
<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2021.108136>
- Matsumiya, K. (2022). Multiple representations of the body schema for the same body part. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(4), e2112318119.
<https://doi.org/10.1073/pnas.2112318119>
- Mays, L. E., & Sparks, D. L. (1980). Dissociation of visual and saccade-related responses in superior colliculus neurons. *Journal of Neurophysiology*, 43(1), 207-232.
<https://doi.org/10.1152/jn.1980.43.1.207>

- Mon-Williams, M. A., Wann, J. P., & Pascal, E. (1999). Visual-proprioceptive mapping in children with developmental coordination disorder. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 41(4), 247-254. <https://doi.org/10.1017/s0012162299000523>
- Naffrechoux, M., Koun, E., Volland, F., Farnè, A., Roy, A. C., & Pélisson, D. (2024). Eyes and hand are both reliable at localizing somatosensory targets. *Experimental Brain Research*. <https://doi.org/10.1007/s00221-024-06922-8>
- Nobusako, S., Osumi, M., Furukawa, E., Nakai, A., Maeda, T., & Morioka, S. (2021). Increased visual bias in children with developmental coordination disorder : Evidence from a visual-tactile temporal order judgment task. *Human Movement Science*, 75, 102743. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2020.102743>
- Nougier, V., Bard, C., Fleury, M., Teasdale, N., Cole, J., Forget, R., Paillard, J., & Lamarre, Y. (1996). Control of single-joint movements in deafferented patients : Evidence for amplitude coding rather than position control. *Experimental Brain Research*, 109(3). <https://doi.org/10.1007/BF00229632>
- O'Brien, J. C., Williams, H. G., Bundy, A., Lyons, J., & Mittal, A. (2008). Mechanisms That Underlie Coordination in Children With Developmental Coordination Disorder. *Journal of Motor Behavior*, 40(1), 43-61. <https://doi.org/10.3200/JMBR.40.1.43-61>
- Piek, J. P., & Coleman-Carman, R. (1995). Kinaesthetic sensitivity and motor performance of children with Developmental Coordination Disorder. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 37(11), 976-984. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.1995.tb11952.x>
- Pipereit, K., Bock, O., & Vercher, J.-L. (2006). The contribution of proprioceptive feedback to sensorimotor adaptation. *Experimental Brain Research*, 174(1), 45-52. <https://doi.org/10.1007/s00221-006-0417-7>
- Pisella, L., André, V., Gavault, E., Le Flem, A., Luc-Pupat, E., Glissoux, C., Barrière, A., Vindras, P., Rossetti, Y., & Gonzalez-Monge, S. (2013). A test revealing the slow acquisition and the dorsal stream substrate of visuo-spatial perception. *Neuropsychologia*, 51(1), 106-113. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2012.11.015>
- Pisella, L., Martel, M., Roy, A. C., Vuillerot, C., & Gonzalez-Monge, S. (2020). Validation of a simple screening test for elementary visuo-spatial perception deficit. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 63(4), 302-308. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2019.03.006>

- Pisella, L., Vialatte, A., Martel, M., Prost-Lefebvre, M., Caton, M., Stalder, M., Yssad, R., Roy, A. C., Vuillerot, C., & Gonzalez-Monge, S. (2021). Elementary visuospatial perception deficit in children with neurodevelopmental disorders. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 63(4), 457-464. <https://doi.org/10.1111/dmcn.14743>
- Prablanc, C., Echallier, J. E., Jeannerod, M., Komilis, E., & de NeuropsychologieExp, L. (1979). Optimal response of eye and hand motor systems in pointing at a visual target; part II. *Biological Cybernetics*, 35, 183-187. <https://doi.org/10.1007/BF00337063>
- Prablanc, C., Pélisson, D., & Goodale, M. A. (1986). Visual control of reaching movements without vision of the limb. I. Role of retinal feedback of target position in guiding the hand. *Experimental Brain Research*, 62(2), 293-302. <https://doi.org/10.1007/BF00238848>
- Rao, A. K., & Gordon, A. M. (2001). Contribution of tactile information to accuracy in pointing movements. *Experimental Brain Research*, 138(4), 438-445. <https://doi.org/10.1007/s002210100717>
- Rusconi, E., Gonzaga, M., Adriani, M., Braun, C., & Haggard, P. (2009). Know thyself: Behavioral evidence for a structural representation of the human body. *PloS One*, 4(5), e5418. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0005418>
- Sainburg, R. L., Poizner, H., & Ghez, C. (1993). Loss of Proprioception Produces Deficits in Interjoint Coordination. *Journal of neurophysiology*, 70(5), 2136-2147. <https://doi.org/10.1152/jn.1993.70.5.2136>
- Sarlegna, F. R., Gauthier, G. M., Bourdin, C., Vercher, J.-L., & Blouin, J. (2006). Internally driven control of reaching movements: A study on a proprioceptively deafferented subject. *Brain Research Bulletin*, 69(4), 404-415. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2006.02.005>
- Schoemaker, M. M., van der Wees, M., Flapper, B., Verheij-Jansen, N., Scholten-Jaegers, S., & Geuze, R. H. (2001). Perceptual skills of children with developmental coordination disorder. *Human Movement Science*, 20(1-2), 111-133. [https://doi.org/10.1016/S0167-9457\(01\)00031-8](https://doi.org/10.1016/S0167-9457(01)00031-8)
- Shadmehr, R., & Krakauer, J. W. (2008). A computational neuroanatomy for motor control. *Experimental Brain Research*, 185(3), 359-381. <https://doi.org/10.1007/s00221-008-1280-5>
- Smith, Y. A., Hong, E., & Presson, C. (2000). Normative and Validation studies of the Nine-Hole Peg Test with children. *Perceptual and Motor Skills*, 823-843. <https://doi.org/10.2466/pms.2000.90.3.823>

- Smits-Engelsman, B. C. M., & Wilson, P. H. (2013). Noise, variability, and motor performance in developmental coordination disorder. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 55, 69-72. <https://doi.org/10.1111/dmcn.12311>
- Smyth, M. M., & Mason, U. C. (1998). Use of proprioception in normal and clumsy children. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 40(10), 672-681. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.1998.tb12327.x>
- Sobinov, A. R., & Bensmaia, S. J. (2021). The neural mechanisms of manual dexterity. *Nature Reviews. Neuroscience*, 22(12), 741-757. <https://doi.org/10.1038/s41583-021-00528-7>
- Sommer, M. A., & Wurtz, R. H. (2008). Brain circuits for the internal monitoring of movements. *Annual Review of Neuroscience*, 31, 317-338. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.31.060407.125627>
- Sumner, E., Hutton, S. B., Kuhn, G., & Hill, E. L. (2018). Oculomotor atypicalities in Developmental Coordination Disorder. *Developmental Science*, 21(1), e12501. <https://doi.org/10.1111/desc.12501>
- Tamè, L., Dransfield, E., Quettier, T., & Longo, M. R. (2017). Finger posture modulates structural body representations. *Scientific Reports*, 7(1), 43019. <https://doi.org/10.1038/srep43019>
- Todorov, E., & Jordan, M. I. (2002). Optimal feedback control as a theory of motor coordination. *Nature Neuroscience*, 5(11), 1226-1235. <https://doi.org/10.1038/nn963>
- Tseng, Y.-T., Holst-Wolf, J. M., Tsai, C.-L., Chen, F.-C., & Konczak, J. (2019). Haptic perception is altered in children with developmental coordination disorder. *Neuropsychologia*, 127, 29-34. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2019.02.004>
- Tseng, Y.-T., Tsai, C.-L., Chen, F.-C., & Konczak, J. (2018). Wrist position sense acuity and its relation to motor dysfunction in children with developmental coordination disorder. *Neuroscience Letters*, 674, 106-111. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2018.03.031>
- Tseng, Y.-T., Tsai, C.-L., Chen, F.-C., & Konczak, J. (2019). Position Sense Dysfunction Affects Proximal and Distal Arm Joints in Children with Developmental Coordination Disorder. *Journal of Motor Behavior*, 51(1), 49-58. <https://doi.org/10.1080/00222895.2017.1415200>
- Vaivre-Douret, L., Lalanne, C., Ingster-Moati, I., Boddaert, N., Cabrol, D., Dufier, J.-L., Golse, B., & Falissard, B. (2011). Subtypes of Developmental Coordination Disorder :

Research on Their Nature and Etiology. *Developmental Neuropsychology*, 36(5), 614-643.
<https://doi.org/10.1080/87565641.2011.560696>

Viel, S., Vaugoyeau, M., & Assaiante, C. (2009). Adolescence : A Transient Period of Proprioceptive Neglect in Sensory Integration of Postural Control. *Motor Control*, 13(1), 25-42. <https://doi.org/10.1123/mcj.13.1.25>

Wilmot, K., Wann, J. P., & Brown, J. H. (2006). Problems in the coupling of eye and hand in the sequential movements of children with Developmental Coordination Disorder. *Child: Care, Health and Development*, 32(6), 665-678. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2214.2006.00678.x>

Wilson, P. H., Ruddock, S., Smits-Engelsman, B., Polatajko, H., & Blank, R. (2013). Understanding performance deficits in developmental coordination disorder : A meta-analysis of recent research. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 55(3), 217-228.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2012.04436.x>

Wolpert, D., Ghahramani, Z., & Jordan, M. (1995). An internal model for sensorimotor integration. *Science*, 269(5232), 1880-1882. <https://doi.org/10.1126/science.7569931>

Wolpert, D. M., Miall, R. C., & Kawato, M. (1998). Internal models in the cerebellum. *Trends in Cognitive Sciences*, 2(9), 338-347. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(98\)01221-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(98)01221-2)

Zimney, K., Dendinger, G., Engel, M., & Mitzel, J. (2020). Comparison of reliability and efficiency of two modified two-point discrimination tests and two-point estimation tactile acuity test. *Physiotherapy Theory and Practice*, 1-10.
<https://doi.org/10.1080/09593985.2020.1719563>

Zwicker, J. G., Harris, S. R., & Klassen, A. F. (2013). Quality of life domains affected in children with developmental coordination disorder : A systematic review: Quality of life in DCD. *Child: Care, Health and Development*, 39(4), 562-580. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2214.2012.01379.x>

Supplementary materials

Tactile detection and discrimination thresholds

We assessed the tactile detection threshold with Semmes-Weinstein Monofilaments Aesthesio® on the palmar distal phalanx of the dominant index finger. Participants were blindfolded and they had to report verbally when they detected a tactile stimulation on their index finger. We performed three descending-ascending assessments between 0.08 and 1.6 millinewtons; we recorded for each descending and each ascending the minimal detected stimulation strength and we calculated the tactile detection threshold as the mean of these six measures.

The tactile discrimination threshold was assessed with the DiskCriminator™. We performed a descending-ascending assessment, every 1mm between 2 and 8 millimetres (protocol adapted from Zimney et al., 2020). Blindfolded participants had to report verbally if they perceived one or two touches on the palmar distal phalanx of their dominant index finger. We recorded the smallest distance between the two stimuli detected as two touches for the descending and the ascending assessments; the mean of these two values corresponded to the tactile discrimination threshold.

Visuospatial abilities

Visuospatial abilities were assessed by the Elementary VisuoSpatial Performances test EVSP (Pisella et al., 2020) which, importantly is performed without the involvement of motor control of the upper limb. This test consists of 6 subtests of 12 items each whereby two shapes are presented and participants have to say if they are identical or not (e.g. same/different size of the circles, same/different position of a dot in a square).

Proprioceptive matching tasks

We assessed the proprioceptive acuity of the elbow by canonical matching tasks (see, for example, Bahmad et al., 2020). Participants were blindfolded and their forearms were strapped to a support allowing the elbow flexion to be modified and measured thanks to an inclinometer (precision =0.2°) attached to it. Subjects performed two ipsilateral remembered matching tasks (one with each arm) and a contralateral matching task. In the ipsilateral tasks, the experimenter set the forearm support to one of the two target angles (10° or 30° of elbow flexion above the default position, in the sagittal plane) for 5 seconds and then returned the forearm to the default position. Participants had to reproduce the memorized position with the same forearm, as accurately as possible. For the contralateral task, the experimenter set the participant's dominant

forearm to the 10° or 30° target positions till the participant matched it with their non-dominant arm.

The tasks order was counterbalanced. Each of the 3 matching tasks contained 10 trials (in a randomized order, 5 per target angle). For each trial, we recorded the relative matching error, namely the angular difference between the participant's response and the target position. A negative value indicated an undershoot of the angle and a positive value indicated an overshoot.

Gesture imitation proficiency

The gesture imitation task was initially designed for the assessment of apraxia in adults (De Renzi et al., 1980) and has been recently adapted for use in children with DCD (Martel et al., 2022). This test consists in imitating 24 different gestures. The experimenter showed the gesture and participants had to imitate as accurately as possible the gesture with their dominant arm/hand. A correct imitation performed at the first attempt scored 3 points while a correct imitation after two demonstrations scored 2 points; if necessary, a third and last demonstration was performed, 1 point was scored for a correct imitation, 0 point in case of failure. We adopted the same scoring criteria as described by Martel et al. (2022): the configuration of the arm and/or hand (e.g. extended arm and fist configuration), the orientation of the limb in space (e.g. palm down) and its target location (e.g. palm on the contralateral shoulder). For sequential gestures, the correct order and number of occurrences (e.g. three repetitions of fist and hand flat on the table sequence) were also considered. Any element differing from any of these criteria was considered an incorrect imitation.

Manual dexterity performances

As a complementary measure of manual dexterity performance, we proposed to all participants a single task – the Nine Hole Peg Test. Participants had to take the nine pegs one by one in the container and place them each into a hole on the board, as quickly as possible. Once they put all the pegs, they had to remove them and put them back in the container. They performed one timed test with both hands (after practicing). A score corresponding to the duration to complete the task was obtained for each hand.

Etude 3 :

Evaluation des capacités perceptives somatosensorielles chez l'adulte présentant un TDC (Rapport préliminaire)

Marion Naffrechoux ^{1,2}, Eric Koun ¹, Frederic Volland ¹, Alessandro Farnè* ¹, Denis
Pélisson* ¹, Alice Catherine Roy* ²

¹ Integrative Multisensory Perception Action and Cognition Team of the Lyon Neuroscience
Research Center INSERM U1028 CNRS U5292 University Lyon 1, Lyon, France

² Laboratoire Dynamique Du Langage CNRS UMR 5596 University Lyon 2, Lyon, France

* These three authors contributed equally to the work

1. Introduction

Le Trouble Développementale de la Coordination (TDC) correspond à des difficultés motrices se traduisant par une maladresse, une lenteur et une imprécision des gestes. Ce trouble affecte près de 6% des enfants d'âge scolaire et les difficultés motrices retrouvées chez ces enfants persistent à l'âge adulte dans 50 à 70% des cas (Blank et al., 2019). Les adultes avec TDC présentent une lenteur d'exécution motrice ainsi qu'une maladresse (Cousins & Smyth, 2003; Kirby et al., 2011). Les déficits d'équilibre et de motricité fine, dans l'écriture par exemple, sont souvent rapportées, ainsi que des difficultés dans l'apprentissage de la conduite (Cousins & Smyth, 2003; Kirby et al., 2011; Tal Saban & Kirby, 2018).

Chez l'enfant présentant un TDC, une hypothèse de déficit des modèles internes, sous-tendant la production et le contrôle des mouvements, a été décrite dans la littérature. Il a été suggéré que des déficits perceptifs (visuels, proprioceptifs et tactiles) pourraient contribuer à ce déficit du contrôle moteur. Si des troubles visuospatiaux ont été mis en évidence, ils ne concernent qu'une proportion d'enfants avec un TDC (Gras et al., 2023b). De plus, certaines activités de la vie quotidienne réalisées sans contrôle visuel sont néanmoins perturbées dans le TDC ; les déficits visuospatiaux des enfants avec un TDC ne peuvent donc pas expliquer la totalité de leur trouble moteur. Concernant les déficits proprioceptifs, leur présence chez l'enfant est débattue. Les capacités de localisation tactile, quant à elles, ont été peu étudiées chez l'enfant. Chez l'adulte, les études sur la perception somatosensorielle sont rares : une seule étude a investigué l'acuité proprioceptive des adultes présentant un TDC par des tâches de repositionnement actif au niveau du poignet (Tseng et al., 2022). Les chercheurs rapportent une erreur moyenne similaire à celle des adultes neurotypiques, mais une variabilité plus grande des réponses. Cette variabilité des réponses était corrélée aux performances de coordination globale (sous-score du BOT-2 incluant une tâche de coordination bilatérale et une tâche d'équilibre), lorsque l'analyse était réalisée sur la population totale (TDC et neurotypiques), suggérant un lien entre les performances motrices et l'acuité proprioceptive. Cependant, cette corrélation peut être due uniquement à la différence d'acuité proprioceptive entre les deux groupes, sans qu'il n'y ait de continuum entre les performances des adultes avec TDC et des adultes neurotypiques. Lorsque l'analyse est réalisée au sein du groupe TDC, la corrélation n'est plus présente, mais l'absence de significativité pourrait être due au faible nombre de participants avec TDC (n=10). Pour ce qui est des capacités tactiles, elles ne semblent pas avoir été étudiées chez l'adulte avec un TDC.

De manière critique, ces capacités perceptives somatosensorielles, et particulièrement les capacités proprioceptives, ont été étudiées, chez l'enfant ou l'adulte avec un TDC, par le biais de tâches impliquant une réponse motrice manuelle qui précisément est perturbée dans le cas du TDC. L'imprécision retrouvée chez les individus avec un TDC dans de telles tâches pourrait donc venir d'un déficit perceptif mais également de la seule imprécision motrice. Ainsi, notre équipe a mis en place un paradigme permettant d'investiguer les capacités perceptives somatosensorielles, sans ce facteur moteur confondant, en utilisant une réponse manuelle mais également une réponse oculaire saccadique pour localiser des cibles somatosensorielles. Les saccades réalisées vers une cible unique sont préservées chez l'enfant (Katschmarsky et al., 2001; Sumner et al., 2018; Wilmut et al., 2006). Chez l'adulte, une étude récente a permis de confirmer la précision préservée des saccades (Sumner & Hill, 2024). En effet, comme chez les enfants, les amplitudes de saccade vers une cible visuelle unique ne diffèrent pas selon que les participants souffrent d'un TDC ou non. Récemment, nous avons révélé la pertinence d'utiliser une réponse oculaire dans des tâches de localisation de cibles somatosensorielles en montrant la forte corrélation entre les erreurs de localisation des réponses manuelles et celles des réponses oculaires chez les adultes neurotypiques (Naffrechoux et al., 2024).

Une étude précédente utilisant ce paradigme a permis de mettre en évidence un déficit proprioceptif chez des enfants avec un TDC âgés de 9 à 12 ans (Naffrechoux et al., en préparation, cf. étude 2). Dans cette étude, l'altération de la précision dans la localisation d'une cible proprioceptive était corrélée aux performances motrices du MABC-2 pour les scores d'équilibre et de lancer/attraper de balles. Des déficits de localisation d'une cible tactile ont également été observés, mais ceux-ci semblent plus discrets puisqu'ils n'affectent que la dimension horizontale de l'erreur et ne sont pas visibles dans toutes les conditions (de position de la stimulation et de durée de la stimulation tactile) ; de plus, cette imprécision n'était pas corrélée à la sévérité des difficultés motrices des enfants avec un TDC. Ainsi, les déficits d'acuité proprioceptive pourraient participer aux difficultés motrices du TDC. Au vu du faible nombre d'investigations chez l'adulte, il semble particulièrement intéressant d'étudier ces capacités somatosensorielles chez l'adulte avec un TDC, dans le but d'en préciser les différences avec les enfants.

L'objectif de cette étude est d'examiner les capacités proprioceptives et tactiles d'adultes présentant un TDC, sans facteur moteur confondant, et de déterminer leur lien éventuel avec les difficultés motrices.

2. Méthode

2.1. Population

Quarante-et-un adultes âgés de 18 à 35 ans ont participé à cette étude : 17 participants présentant un TDC et 24 participants contrôles. Les premiers ont été recrutés par le biais de l'association Dyspraxie France Dys et de la mission Handicap des universités de Lyon (Lyon 1 et Lyon 2), en diffusant l'annonce de recrutement de l'étude. Les participants contrôles ont également proposé leur participation suite à la réception de l'information de recrutement via leur université. Les participants des deux groupes ne devaient pas présenter de déficience intellectuelle, de pathologie neurologique, ni de TSA ; ils ne devaient pas être nés prématurément.

Compte tenu du sous-diagnostic du TDC dans l'enfance il y a quelques années en France³ et des difficultés de diagnostic à l'âge adulte à l'heure actuelle (manque d'outil standardisé notamment), un diagnostic de TDC n'était pas indispensable pour participer à notre étude. Sur les 17 participants du groupe TDC, 14 avaient reçu un diagnostic avant leur participation, les 3 autres ont exprimé de fortes suspicions de TDC au vu de leurs difficultés motrices dans le quotidien. Pour confirmer l'inclusion des participants dans le groupe TDC, les quatre critères diagnostiques du DSM-5 ont été vérifiés par un professionnel de santé. Aucun outil standardisé n'étant disponible en France pour évaluer les performances motrices d'adultes, celles-ci ont été évaluées par le MABC-2 (S. E. Henderson et al., 2007) en se référant aux normes établies pour les jeunes de 16 ans à 16 ans 11 mois, comme recommandé par l'EACD (Blank et al., 2019) et déjà appliqué dans différentes études chez l'adulte avec TDC (Job et al., 2019; Wilmut et al., 2013; Wilmut & Byrne, 2014). Les participants devaient présenter un score total et/ou l'un des sous-scores du MABC-2 égal ou inférieur au 16^{ème} percentile (critère A du DSM-5). Les critères B (*i.e.* impact négatif des difficultés motrices sur les AVQ) et C (*i.e.* début des symptômes dans l'enfance) ont été vérifiés grâce au questionnaire 'Adult Developmental coordination disorder/Dyspraxia Checklist' (ADC) (Kirby et al., 2010). Ce questionnaire ne bénéficiant pas de version française validée, nous avons utilisé une traduction réalisée par notre équipe. Les seuils révisés du questionnaire original indiquent la présence de difficultés motrices dans

³ Le TDC est aujourd'hui mieux diagnostiqué dans le domaine clinique en France, mais les parents d'enfants présentant un TDC ainsi que les associations relatent régulièrement des problèmes d'errance médicale avant de recevoir un diagnostic de TDC. La mise en place de Plateformes de Coordination et d'Orientation (PCO) rend le parcours du patient moins laborieux et permet de faciliter l'accès à un diagnostic, mais celles-ci ont été mises en place en 2018. Le TDC était probablement largement sous-diagnostiqué en France. Il est donc possible que de nombreux adultes n'aient pas reçu de diagnostic dans leur enfance malgré leurs difficultés au quotidien.

l'enfance pour un score supérieur ou égal à 17 dans la Section 1 ; un score total supérieur à 56 indique un risque de TDC, et un score total supérieur à 65 indique un TDC probable (Kirby, 2011) ; ces scores-seuils ont été remis en question dans des études chez l'adulte avec un TDC, qui ont alors utilisé le score de 6 comme seuil pathologique pour la Section 1, et 25 pour le score total (Hyde et al., 2014, 2018). Enfin, l'absence de déficience intellectuelle et de pathologies neurologiques (critère D) a été vérifiée par un entretien avec les participants. Trois participants avec TDC (ayant reçu un diagnostic de TDC dans l'enfance) ont été exclus en raison d'un score au MABC-2 au-dessus du seuil fixé. Deux participants du groupe TDC ont obtenu un score total inférieur à 56 au questionnaire ADC (*i.e.* inférieur au score-seuil décrit par Kirby et al. 2011) ; ces participants ont montré des performances motrices altérées au MABC-2, et ont rapporté des difficultés motrices dans l'enfance (l'un a été diagnostiqué dans l'enfance et son dossier médical indique une plainte du patient dans les AVQ, le second obtient un score de 19 à la Section 1). Compte tenu (i) des performances motrices faibles chez ces patients et (ii) des critiques émises quant aux scores seuils de ce questionnaire (Hyde et al., 2014; Meachon et al., 2022), ces participants ont été inclus dans cette analyse préliminaire.

Les participants du groupe contrôle ne devaient pas présenter de TND, ni avoir de fratrie ou parents ayant un diagnostic de TND. Leurs scores (total et sous-scores) au MABC-2 devaient être au moins au 37^{ème} percentile. Enfin, les participants devaient obtenir un score total à l'ADC inférieur à 56. Onze participants ont été exclus à cause d'un score total ou un sous-score du MABC-2 trop faible.

Au total, pour cette analyse préliminaire, le groupe TDC était constitué de 14 participants (âge moyen = 24.25 ans \pm 5.51 ; 8H/6F), et le groupe contrôle de 13 participants (âge moyen = 23.40 ans \pm 4.41 ; 7H/6F). Les deux groupes étaient appariés en âge ($t(24.50) = -0.45$, $p=0.66$). Concernant la latéralité évaluée par le questionnaire de latéralité d'Edinburgh (Oldfield, 1971), nous n'avons pas observé de différence significative entre les groupes ($t(18.56) = 1.85$, $p=0.08$) ; trois participants du groupe TDC et seulement un participant contrôle sont gauchers. Nous porterons une attention particulière à l'équilibre de ce paramètre pour la suite du recrutement des participants. Enfin, les deux groupes présentaient une différence significative concernant le score ADC ($t(24.86) = -7.98$, $p<0.001$), confirmant les difficultés dans les AVQ pour le groupe TDC par rapport au groupe contrôle. Les données descriptives sont présentées dans le Tableau 1.

Ce protocole a reçu l’approbation du comité d’éthique CPP Ouest V. Les participants ont donné leur consentement écrit avant leur inclusion dans l’étude ; ils ont reçu une indemnisation de 80 euros à la suite de leur participation au protocole global, comprenant l’étude présentée ci-dessous ainsi qu’une expérimentation complémentaire de plasticité du schéma corporel (cf. section Procédure générale). Les participants ont été dédommagés de leurs frais de déplacement.

Groupe	Sexe	Latéralité	Âge (ans)	ADC	Total MABC-2	DM MABC-2	VA MABC-2	Eq MABC-2
Contrôle	7H/6F	12D/1G	23.4 ± 4.41	21.08 ± 13.17	11.38 ± 1.26	11.31 ± 1.11	10.62 ± 1.39	10.38 ± 1.04
TDC	8H/6F	11D/3G	24.25 ± 5.51	64.93 ± 15.34	4.79 ± 2.81	5.57 ± 2.62	5.14 ± 3.53	7.5 ± 2.77

Tableau 1. Données descriptives des participants inclus dans l’étude pour chaque groupe (contrôle et TDC). Les variables quantitatives sont indiquées sous la forme : moyenne ± écart-type. Score total et sous-scores MABC-2 : note standard. DM=Dextérité manuelle ; VA = Viser et attraper ; Eq = Equilibre.

2.2. Procédure générale

L’expérimentation comprenait les tâches de localisation (proprioceptive et tactile, dans un ordre contrebalancé entre les participants) décrites dans les études 1 et 2 du chapitre Contributions expérimentales, ainsi qu’une évaluation sensorimotrice identique à celle réalisée dans l’étude 2, composée du MABC-2 ainsi que d’évaluations complémentaires (**Figure 7**). Cette étude s’incluant dans un projet plus global, une tâche supplémentaire visant à évaluer la plasticité du schéma corporel était également administrée en fin de protocole. Cette dernière, qu’on appellera ici ‘tâche d’utilisation d’outil’, ne sera pas décrite dans ce chapitre (voir Martel et al., 2022 pour le protocole réalisé chez l’enfant avec un TDC), mais seulement évoquée pour exposer le déroulement complet de la participation. La durée totale de participation était de 4 heures, réparties en deux sessions de 2 heures chacune.

Les 21 premiers participants (11 avec TDC, 10 participants contrôles) ont réalisé le MABC-2 et les évaluations complémentaires dans un ordre contrebalancé, en début de chaque session. Sur les 10 participants du groupe contrôle, 4 ont été exclus par la suite en raison d’un score au MABC-2 trop faible ; 2 participants avec TDC ont été exclus pour un score trop élevé. Au vu de ce nombre élevé d’exclusions *a posteriori*, nous avons décidé, pour la suite des inclusions, de débiter systématiquement la première session par la passation du MABC-2, dans le but

d'inclure uniquement les participants répondant aux critères fixés de score du MABC-2. Les participants 22 à 41 ont donc tous commencé par réaliser le MABC-2 ; les évaluations complémentaires avaient lieu en début de seconde session. Parmi ces 19 participants, un participant avec TDC et sept participants contrôles ont été exclus sur la base de leur score MABC-2 (sans poursuivre la suite de l'expérimentation).

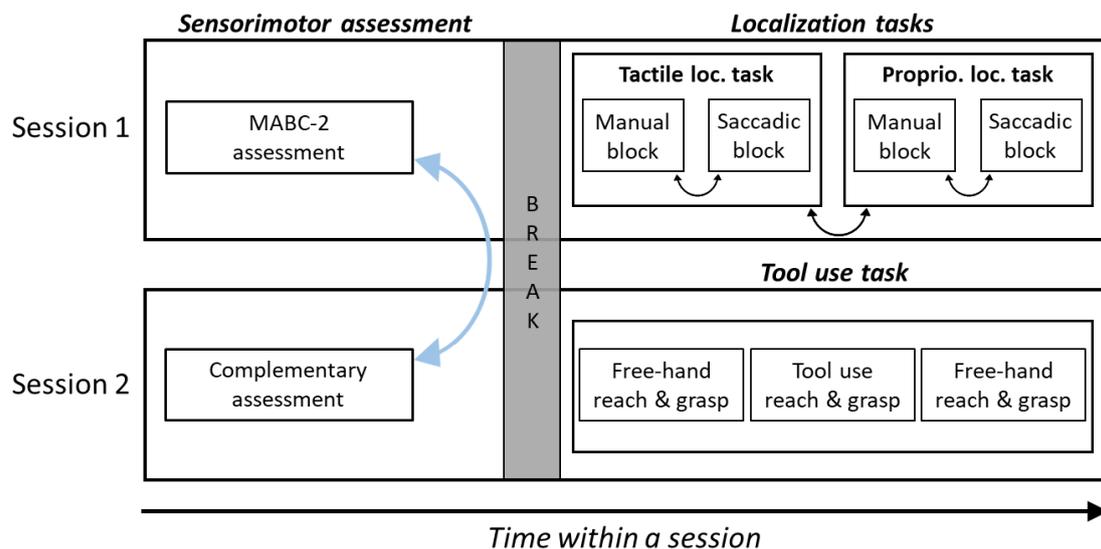


Figure 7. Déroulement de l'expérimentation pour le protocole global (incluant la tâche d'utilisation d'outil 'tool use task'. Les deux sessions peuvent être réalisées sur la même journée ou sur deux jours séparés. Les flèches noires indiquent l'ordre contrebalancé des tâches de localisation (proprioceptive et tactile), et des types de blocs (manuel et saccadique). La flèche bleue indique l'ordre contrebalancé de l'évaluation sensorimotrice (MABC-2 et évaluations complémentaires) pour les participants 1 à 21 ; pour les participants 22 à 41, la première session débutait systématiquement par la passation du MABC-2.

2.3. Tâches de localisation

2.3.1. Dispositif et matériel

Le dispositif expérimental pour les tâches de localisation, illustré dans la **Figure 8**, est identique aux études 1 et 2 décrites précédemment. Les participants sont assis, face à une table, la tête reposant sur une mentonnière. Ils sont équipés d'un dispositif d'oculométrie (Pupil Core 200Hz, Pupil Labs) permettant d'enregistrer les mouvements des yeux. Ce dispositif comprend deux caméras miniatures permettant de filmer les yeux, ainsi qu'une caméra de scène filmant l'environnement, toutes trois fixées sur une monture de lunettes. L'avant-bras dominant des participants caché à leur vue pendant toute la durée de la tâche par une dalle tactile opaque verticale (27", surface à technologie capacitive, 3M ; résolution horizontale : 0.03cm, résolution

verticale : 0.09cm), est attaché à un support permettant à l'expérimentateur de modifier l'angle de flexion du coude dans un plan parallèle à la dalle tactile. En position initiale, l'avant-bras est horizontal, l'angle entre l'avant-bras et le bras est d'environ 120°, l'épaule fléchie à environ 60°. La main repose sur le support, paume tournée vers le sol, les doigts étendus et sans contact entre eux. Un interrupteur de départ est disposé devant le participant à 30cm de la mentonnière et 15cm de la dalle tactile ; une LED rouge représentant le point de fixation est placée à côté du bouton de départ de la main.

Pour la tâche de localisation tactile, deux stimulateurs mécaniques (QuaeroSys, Piezostimulator), délivrant un stimulus vibro-tactile supraliminaire à 50Hz, sont fixés à la main dominante : l'un se trouve sur la phalange distale de l'index et l'autre sur la phalange proximale du pouce. Un troisième stimulateur se trouve à côté du support d'avant-bras, entre les deux autres stimulateurs dans le plan sagittal ; il est activé systématiquement lorsque l'un des deux autres produit une stimulation sur l'index ou le pouce, servant ainsi de leurre en masquant les indices auditifs qui pourraient contribuer à la localisation du stimulus tactile.

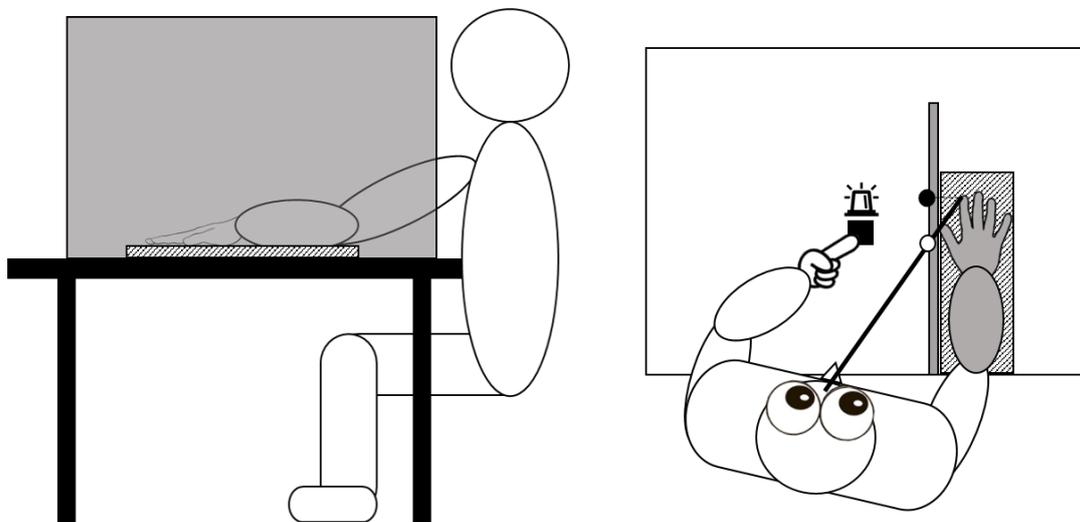


Figure 8. Dispositif expérimental utilisé pour les tâches de localisation proprioceptive et tactile. Illustration du dispositif pour les participants droitiers ; pour les participants gauchers, l'ensemble du dispositif est inversé (e.g. avant-bras gauche reposant sur le support).

2.3.2. Procédure

La procédure était identique au protocole de tâches de localisation de l'étude 1 (Naffrechoux et al., 2024). L'ordre entre la tâche proprioceptive et la tâche tactile était contrebalancé entre les participants (**Figure 7**). Dans chaque tâche, les participants devaient localiser une cible

somatosensorielle par le biais de deux effecteurs : un pointage manuel du membre non dominant et une saccade oculaire. Deux positions cibles et deux durées d'encodage étaient également proposées. Ainsi, chaque tâche était constituée de deux blocs (manuel et saccadique), dont l'ordre était contrebalancé. Au sein de chaque bloc, la présentation des conditions de position cible et de durée d'encodage était pseudo-randomisée, selon un ordre identique pour tous les participants. Chaque bloc était constitué de 40 essais, soit 10 répétitions par combinaison de conditions (2 positions cibles x 2 durées d'encodage).

Tâche de localisation proprioceptive

Pour débiter un essai, les participants devaient appuyer soit sur le bouton de départ avec leur index de la main non dominante dans le 'bloc manuel', soit regarder le point de fixation dans le 'bloc saccadique'. L'expérimentateur plaçait ensuite l'avant-bras du participant dans l'une des deux positions cibles : 10° ou 30° de flexion du coude dans le plan sagittal depuis la position de départ, correspondant ainsi à un angle de respectivement 110° ou 90° entre l'avant-bras et le bras. L'avant-bras restait dans cette position cible pendant 2 ou 4 secondes, correspondant aux deux durées d'encodage. Après cette durée d'encodage, un signal sonore indiquait aux participants de localiser aussi précisément et rapidement que possible le bout de l'index de leur main dominante caché derrière la dalle tactile opaque. Pour les essais du 'bloc manuel', les participants devaient localiser la cible en réalisant un pointage avec l'index de leur main non dominante sur la dalle tactile ; plus précisément, ils devaient pointer la cible en touchant la projection orthogonale de la position estimée du bout de leur index (*i.e.* point noir sur la **Figure 8**). Dans le 'bloc saccadique', au moment du signal sonore, le point de fixation disparaissait, indiquant au participant d'exécuter, aussi précisément et rapidement que possible, une saccade oculaire afin de diriger le regard vers la position estimée du bout de leur index caché derrière la dalle tactile ; les coordonnées binoculaires recueillies correspondaient ainsi à la position du point blanc sur la **Figure 8**. Après la réponse (manuelle ou oculaire) du participant, l'expérimentateur installait à nouveau l'avant-bras dominant dans la position initiale (*i.e.* avant-bras dans le plan horizontal) et les participants replaçaient leur index non dominant ou leurs yeux sur le bouton de départ ou le point de fixation.

Tâche de localisation tactile

La tâche tactile était similaire à la tâche proprioceptive, exceptée la présence de brèves stimulations vibro-tactiles sur l'avant-bras dominant qui restait en position fixe durant toute la

tâche (30° depuis la position initiale). La stimulation vibro-tactile était délivrée sur l'une des deux positions cibles de la main dominante (*i.e.* sur l'index ou sur le pouce). La vibration durait 0.2 ou 1.5 secondes selon la condition de durée d'encodage. A la fin de cette stimulation, le signal sonore (et l'extinction du point de fixation) indiquait au participant de localiser la stimulation tactile cachée derrière la dalle tactile, aussi précisément et rapidement que possible, en exécutant un pointage de leur index non dominant dans le 'bloc manuel' ou une saccade oculaire dans le 'bloc saccadique'.

2.3.3. Mesure des points de référence et correction de parallaxe

La procédure de recueil des points de référence pour chaque cible était strictement identique à la procédure de Naffrechoux et al. (2024), tout comme le calcul de la fonction de calibration oculomotrice pour la correction de l'erreur de parallaxe. Ces procédures, qui sont décrites en détails dans les sections 2.3.3 et 2.3.4 de l'article de l'étude 1, ne seront pas présentées ici à nouveau.

2.3.4. Traitement des données

Pour chaque essai des 'blocs saccadiques', nous avons déterminé les coordonnées horizontales et verticales de la position du regard à la fin de la première saccade. Les signaux de position des yeux sont recueillis dans le plan de la dalle tactile (correspondant au point blanc de la **Figure 8** pour la cible de l'index par exemple), mais la cible réelle visée par les participants se situe quelques centimètres après la dalle. Pour corriger l'erreur de parallaxe, nous avons utilisé la fonction de calibration oculomotrice calculée pour chaque participant (cf. section 2.3.4 de l'étude 1), que nous avons appliquée à chacun des essais 'saccadiques' et chacun des points de référence oculaires. Ceci nous a ainsi permis de convertir les données recueillies par l'oculomètre dans un système de coordonnées identique et dans le même plan que les données de réponse manuelle. Nous avons ensuite calculé la différence entre ces coordonnées oculaires converties de fin de première saccade et les coordonnées oculaires converties des points de référence, donnant ainsi pour chaque essai l'erreur horizontale de localisation et l'erreur verticale (en centimètres).

Pour les 'blocs manuels', les erreurs horizontales et verticales (en centimètres) étaient recueillies pour chaque essai en calculant la différence entre la position du pointage manuel sur la dalle et la position de référence manuelle sur chacun des axes.

Les résultats présentés dans ce rapport étant préliminaires, les données oculaires pour la tâche proprioceptive proviennent de 16 participants (8 TDC et 8 contrôles) ; les données manuelles de 25 participants (13 TDC et 12 contrôles) ont été incluses dans l'analyse. Les données oculaires manquantes sont dues à un mauvais signal oculaire empêchant le traitement des données, ou à un traitement des données encore en cours ; les données manuelles manquantes (1 TDC et 1 contrôle) sont dues à un problème technique ayant empêché l'enregistrement correct des points de référence sur la dalle tactile. Pour la tâche tactile, les données oculaires n'ont pas été incluses dans l'analyse du fait du nombre trop faible de données traitées ; les données manuelles des 27 participants (14 TDC et 13 contrôles) ont été analysées.

2.4. Evaluations complémentaires

Différentes évaluations complémentaires étaient administrées au début de l'une des sessions (**Figure 7**), dans le but d'établir un profil complet des participants. Nous avons ainsi évalué les seuils de détection et de discrimination tactiles avec les Monofilaments de Semmes-Weinstein et le 'Two point discrimination', les capacités visuospatiales avec le test 'Performances VisuoSpatiales Elementaires' (PVSE) (Pisella et al., 2020), l'acuité proprioceptive du coude avec des tâches de repositionnement actif ipsilatéral et controlatéral, les capacités d'imitation de gestes (De Renzi et al., 1980) et les performances de dextérité manuelle avec une tâche de pegboard (Smith et al., 2000). Les capacités attentionnelles ont également été examinées à travers une traduction réalisée par notre équipe du questionnaire 'Conners' adult ADHD rating scales' (CAARS) (Conners et al., 1999). Les procédures détaillées de chacune des tâches sont décrites dans les annexes de l'étude 2.

2.5. Statistiques

L'analyse statistique a été réalisée avec le logiciel R (v4.2.2; RStudio v2022.12.0; R Core Team 2024). L'analyse des Modèles Linéaires Mixtes (MLM) a été conduite avec le package 'lme4' pour créer le modèle (Bates et al., 2015) et le package 'lmerTest' (Kuznetsova et al., 2017) pour obtenir les effets principaux à partir des résultats de 'lme4'. Des tests post-hoc pour comparaisons multiples (Tukey) ont été réalisés pour les interactions significatives avec le package 'emmeans' (Hothorn et al., 2008). Les T-tests ont été réalisés avec le package 'stats'.

Tâches de localisation. Les erreurs horizontales et verticales ont été analysées séparément pour chaque tâche. Les MLM ont évalué les effets du Groupe (TDC/Contrôle), de l'Effecteur (manuel/oculaire), de la Position cible (10°/30° pour la tâche proprioceptive, index/pouce pour

la tâche tactile) et de la Durée d'encodage (2 secondes/4 secondes pour tâche proprioceptive, 0.2 secondes/1.5 secondes pour la tâche tactile) : chacun de ces facteurs a été considéré en tant qu'effet fixe. Le Participant a été inclus dans l'analyse comme effet variable, dans le but de tenir compte de la variabilité inter-individuelle. Nous avons également ajouté les facteurs intra-sujets comme pente variable intra-sujet pour réduire la variance résiduelle du modèle. La syntaxe du modèle le plus complexe ne montrant pas de problème de convergence était donc la suivante : Erreur de localisation ~ Groupe * Effecteur * Position cible * Durée d'encodage + (Effecteur * Position cible) | Participant). Seul le facteur Effecteur n'était pas inclus dans l'analyse de la tâche tactile (puisque les réponses oculaires n'ont pas été incluses dans cette analyse préliminaire).

Evaluations complémentaires. Une analyse en MLM a été conduite pour évaluer les performances de dextérité manuelle avec la tâche de pegboard (Nine Hole Peg Test), avec les facteurs de Groupe (TDC/Contrôle) et de Main (Dominante/Non dominante) en tant qu'effets fixes. Le facteur Participant a été inclus en tant que facteur variable afin de tenir compte de la variabilité inter-individuelle. Une analyse similaire a été réalisée pour l'erreur de repositionnement relative de la tâche de repositionnement évaluant l'acuité proprioceptive : le MLM évaluait l'effet fixe des trois facteurs suivants : Groupe (TDC/Contrôle), Type de tâche (Ipsilatérale bras dominant/Ipsilatérale bras non-dominant/Controlatérale), et la Position cible (10°/30°) ; le facteur Participant était encore une fois ajouté en tant qu'effet variable. Les facteurs intra-sujets (Type de tâche et Position cible) ont été ajoutés en tant que pentes variables intra-sujets pour améliorer le modèle. Le modèle montrant le moins de variance résiduelle sans révéler de problème de convergence a été sélectionné, correspondant à la syntaxe suivante : Erreur de repositionnement ~ Groupe * Type de tâche * Position cible + (Type de tâche * Position cible | Participant). Pour toutes les autres évaluations, nous avons réalisé une série de T-tests pour comparer les deux Groupes (TDC/Contrôle).

3. Résultats

3.1. Tâche de localisation proprioceptive

3.1.1. Erreur horizontale

Nous n'avons pas retrouvé de différence entre les deux groupes concernant l'erreur horizontale ($F(1) = 0.921, p = 0.348$), ni d'effet de l'effecteur ($F(1) = 2.348, p = 0.147$).

L'analyse du MLM a révélé une interaction significative entre le groupe et l'effecteur ($F(1) = 4.748, p = 0.046$; **Figure 9**). Les tests post-hoc n'ont pas mis en évidence de différence entre les groupes ni pour la réponse manuelle ($t = 0.067, p = 0.947$) ni pour la réponse saccadique ($t = 1.770, p = 0.094$). En revanche, l'erreur saccadique (moyenne = $-7.22\text{cm} \pm 4.78$) était plus grande que l'erreur manuelle (moyenne = $-4.45\text{cm} \pm 4.36$) dans le groupe TDC ($t = 2.592, p = 0.021$) ; aucune différence n'a été retrouvée entre les deux effecteurs dans le groupe contrôle ($t = -0.478, p = 0.640$).

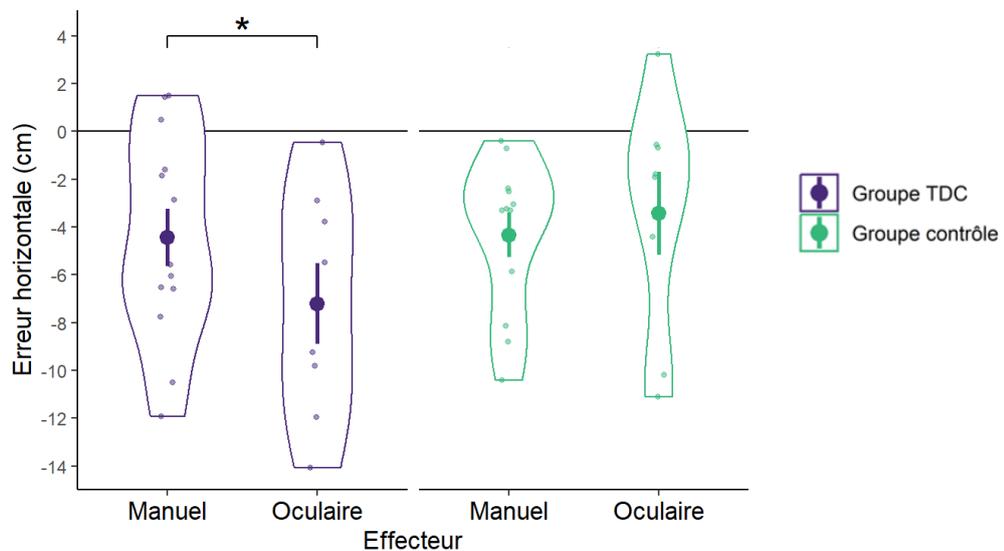


Figure 9. Erreurs horizontales dans la tâche de localisation proprioceptive, en fonction du groupe et de l'effecteur. Des valeurs négatives indiquent des erreurs proximales. Dans le groupe TDC, les erreurs sont plus grandes pour l'effecteur oculaire que pour l'effecteur manuel. Les performances du groupe TDC sont représentées en violet, celles du groupe contrôle en vert. Le point le plus large indique l'erreur moyenne de localisation, les lignes verticales représentent l'erreur standard. Les autres points représentent les performances individuelles. La largeur de la surface correspond à la distribution des données. L'astérisque indique la significativité ($p < 0.05$)

Une interaction significative entre le groupe, la position cible et la durée d'encodage a également été mise en évidence par le MLM ($F(1) = 5.635, p = 0.018$). Aucune différence n'a

été mise en évidence entre les groupes, quelle que soit la condition de position cible et de durée d'encodage ($p > 0.135$). Nous n'avons pas retrouvé de différence entre les positions cibles ($p > 0.191$). La durée d'encodage courte menait à des erreurs plus grandes (moyenne = $-4.26\text{cm} \pm 3.85$) que la durée d'encodage longue (moyenne = $-3.86\text{cm} \pm 3.80$), seulement dans le groupe contrôle et pour la position cible de 10° ($t = -2.178, p = 0.030$).

Enfin, l'analyse du MLM a révélé une interaction significative entre l'effecteur, la position cible et la durée d'encodage ($F(1) = 4.800, p = 0.029$). Les tests post-hoc n'ont pas montré de différence entre les deux durées d'encodage, quelle que soit la condition de la position cible et l'effecteur ($p > 0.111$). L'erreur saccadique (moyenne = $-5.88\text{cm} \pm 5.19$) était plus importante que l'erreur manuelle (moyenne = $-4.33\text{cm} \pm 3.94$) seulement pour la position cible de 10° et lorsque la durée d'encodage était courte ($t = 2.129, p = 0.049$). Enfin, l'erreur était plus importante pour la position cible de 10° (moyenne = $-5.88\text{cm} \pm 5.19$) par rapport à la position de 30° (moyenne = $-4.79\text{cm} \pm 5.60$) seulement lors de la réponse saccadique lorsque la durée d'encodage était courte ($t = -2.106, p = 0.048$).

3.1.2. Erreur verticale

Le groupe TDC (moyenne = $4.42\text{cm} \pm 2.40$) a montré des erreurs verticales significativement plus grandes que le groupe contrôle (moyenne = $2.45\text{cm} \pm 2.48$), comme le révèle l'effet principal du groupe ($F(1) = 4.683, p = 0.041$). Les erreurs dans la position cible de 10° (moyenne = $5.14\text{cm} \pm 2.84$) étaient plus grandes que les erreurs à 30° (moyenne = $1.85\text{cm} \pm 3.04$) ($F(1) = 28.528, p < 0.001$).

Une interaction significative entre le groupe et l'effecteur a également été retrouvée ($F(1) = 7.228, p = 0.018$; **Figure 10**). Les analyses post-hoc ont mis en évidence des erreurs plus grandes dans le groupe TDC (moyenne = $5.57\text{cm} \pm 4.21$) par rapport au groupe contrôle (moyenne = $1.09\text{cm} \pm 3.15$) seulement pour la réponse saccadique ($t = -2.806, p = 0.011$) ; les deux groupes ont montré des performances similaires pour la réponse manuelle ($t = -0.972, p = 0.341$). De plus, la réponse manuelle (moyenne = $3.20\text{cm} \pm 2.56$) conduisait à des erreurs plus importantes que la réponse saccadique (moyenne = $1.09\text{cm} \pm 3.15$) dans le groupe contrôle ($t = 2.385, p = 0.032$), mais l'effecteur n'affectait pas l'erreur dans le groupe TDC ($t = -1.438, p = 0.173$).

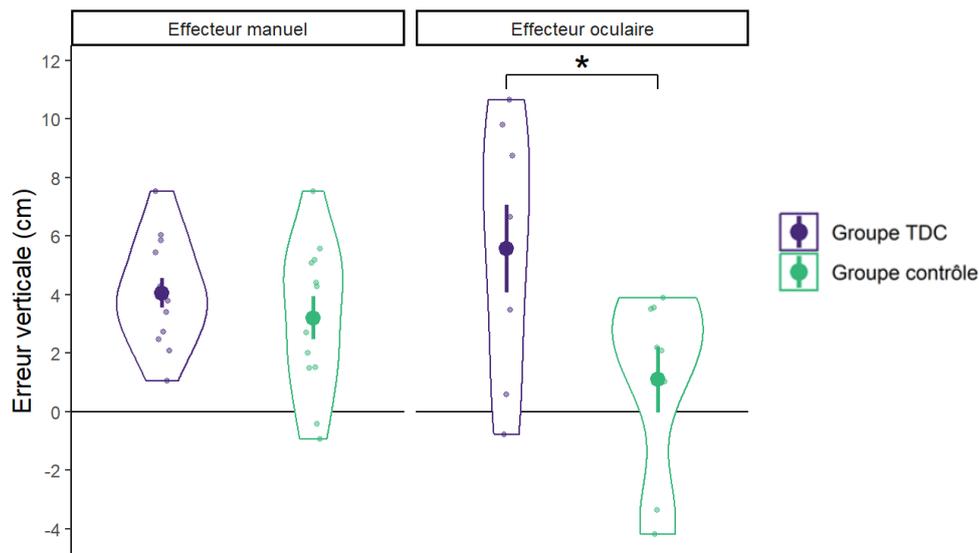


Figure 10. Erreurs verticales dans la tâche de localisation proprioceptive, en fonction du groupe et de l'effecteur. Des valeurs positives indiquent des erreurs au-dessus de la cible. Les erreurs de l'effecteur oculaire sont plus grandes dans le groupe TDC en comparaison du groupe contrôle. Conventions identiques à la Figure 9

Enfin, l'interaction entre l'effecteur, la position cible et la durée d'encodage était également significative ($F(1) = 4.011, p = 0.045$). Les tests post-hoc ont montré que la durée d'encodage courte menait à des erreurs plus importantes (moyenne = $5.58\text{cm} \pm 4.00$) que la durée d'encodage longue (moyenne = $4.87\text{cm} \pm 4.51$), pour la réponse saccadique seulement et dans la position cible de 10° ($t = 2.370, p = 0.018$). L'erreur était plus importante pour la position cible de 10° que pour la position cible de 30° , et ce quelle que soit la condition d'effecteur et de durée d'encodage ($p \leq 0.030$) (cf. effet principal de la position cible). Enfin, l'effecteur n'affectait pas l'erreur verticale, quelle que soit la condition de position cible et de durée d'encodage ($p \geq 0.055$).

3.2. Tâche de localisation tactile

3.2.1. Erreur horizontale

Nous n'avons pas observé de différence entre les groupes TDC et contrôle sur l'erreur horizontale ($F(1) = 0.633, p = 0.434$; **Figure 11**). La position cible ($F(1) = 22.462, p < 0.001$) et la durée d'encodage ($F(1) = 12.893, p < 0.001$) affectaient l'erreur de localisation horizontale.

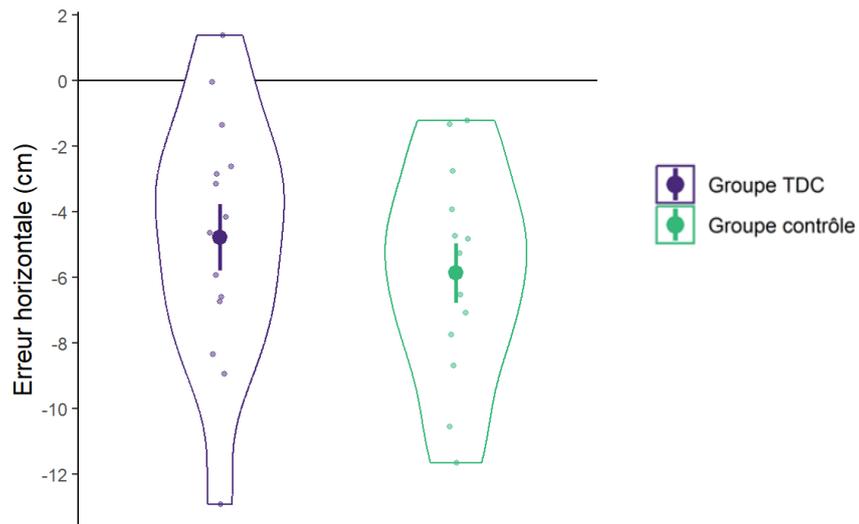


Figure 11. Erreurs horizontales dans la tâche de localisation tactile en fonction du groupe. Aucune différence significative n'est observée entre les deux groupes. Conventions identiques à la Figure 9

L'analyse du MLM a révélé une interaction significative entre la position cible et la durée d'encodage ($F(1) = 4.519, p = 0.034$). Les tests post-hoc ont mis en évidence une erreur plus importante lorsque la stimulation était appliquée à l'index (durée courte = $-6.62\text{cm} \pm 3.71$; durée longue = $-6.10\text{cm} \pm 3.73$) par rapport au pouce (durée courte = $-4.32\text{ cm} \pm 3.73$; durée longue = $-4.19\text{ cm} \pm 3.70$), et ce quelle que soit la condition de durée d'encodage ($t = -5.100$ et $t = -4.251$ pour la durée courte et longue respectivement, $p < 0.001$) (cf. effet principal de la position cible). Une erreur plus grande a également été mise en évidence lorsque la stimulation était courte par rapport à la stimulation longue, uniquement lorsqu'elle était appliquée à l'index ($t = -4.050, p < 0.001$) ; la durée d'encodage n'affectait pas l'erreur horizontale pour la stimulation au niveau du pouce ($t = -1.030, p = 0.303$).

3.2.2. Erreur verticale

Aucune différence entre les groupes n'a été mise en évidence concernant l'erreur de localisation verticale ($F(1) = 1.109, p = 0.302$; **Figure 12a**).

En revanche, nous avons observé une taille d'erreur plus importante lorsque la stimulation tactile était appliquée à l'index (moyenne = $-1.45\text{cm} \pm 3.47$) par rapport au pouce (moyenne = $-0.44\text{cm} \pm 3.18$) ($F(1) = 5.699, p = 0.025$; **Figure 12b**). L'erreur était également plus

importante lorsque la durée d'encodage était longue (moyenne = $-1.07\text{cm} \pm 3.18$) par rapport à une durée plus courte (moyenne = $-0.83\text{cm} \pm 3.13$) ($F(1) = 6.502, p = 0.011$).

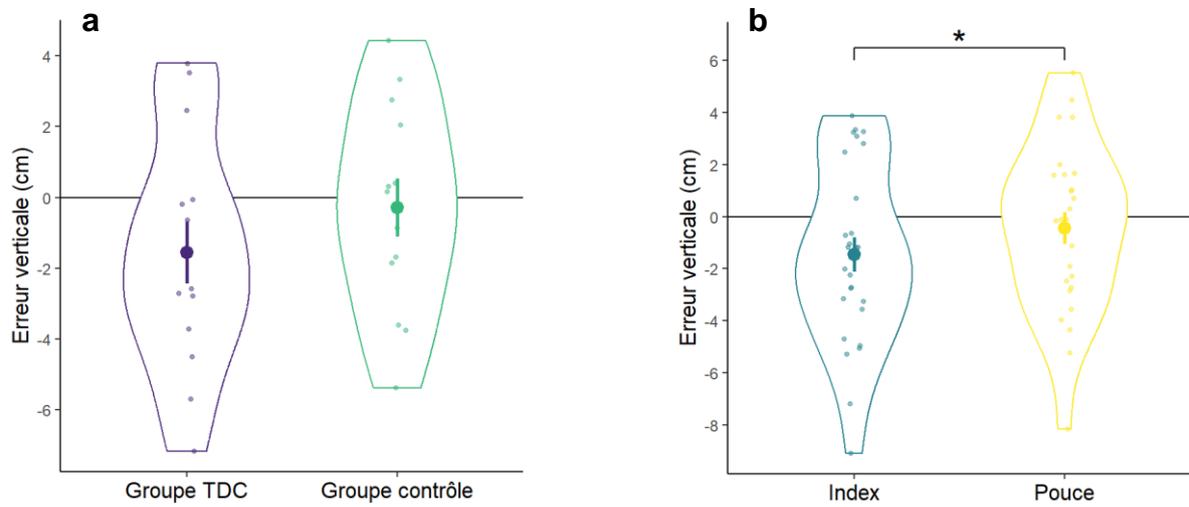


Figure 12. Erreurs verticales dans la tâche de localisation tactile, en fonction du groupe à gauche, et en fonction de la position de stimulation à droite. **a.** Aucune différence n'est observée entre les groupes. **b.** Les erreurs sont plus grandes lorsque la stimulation est appliquée à l'index en comparaison d'une stimulation sur le pouce. Conventions identiques à la Figure 9

3.3. Evaluations complémentaires

Seuils de détection et de discrimination tactiles. Les seuils de détection et de discrimination tactiles ne différaient pas entre les deux groupes puisqu'aucune différence significative n'a été retrouvée (seuil de détection : $t(13.65) = -1.71, p = 0.11$; seuil de discrimination : $t(24.82) = -1.44, p = 0.16$)).

Capacités visuospatiales (PVSE). Le groupe TDC montre des performances visuospatiales plus faibles (moyenne = 62.6 ± 2.3) que le groupe contrôle (moyenne = 67.1 ± 2.4), comme le montre la différence significative du score de PVSE ($t(24.68) = 5.04, p < 0.001$).

Tâches de repositionnement proprioceptif. Nous n'avons pas observé d'effet significatif du Groupe sur l'erreur de repositionnement ($F(1) = 1.39, p = 0.25$; **Figure 13**). L'analyse du MLM a révélé une interaction significative entre le Type de tâche et la Position cible ($F(1) = 17.65, p < 0.001$) ; les tests post-hoc ont mis en évidence que les erreurs étaient significativement plus grandes pour la position cible de 10° par rapport à 30° dans les deux tâches ipsilatérales (à 10° : moyennes = $4.33^\circ \pm 2.44$ et $4.79^\circ \pm 2.22$, bras dominant et bras non dominant respectivement ; à 30° : moyennes = $2.38^\circ \pm 2.25$ et $2.84^\circ \pm 3.02$; $p = 0.003$) alors que la position cible n'affectait pas l'erreur dans la tâche controlatérale (moyenne à $10^\circ = 4.08^\circ \pm 3.08$; moyenne à $30^\circ = 4.93^\circ$

± 4.40 ; $p = 0.247$). De plus, à la position cible de 30° , les erreurs étaient significativement plus grandes dans la tâche controlatérale par rapport aux tâches ipsilatérales ($t = 3.266$ et 3.224 , $p = 0.008$ et 0.009 pour le bras dominant et non dominant respectivement), ces deux dernières ne présentant pas de différence ($t = -0.960$, $p = 0.608$). Aucune différence significative n'a été retrouvée en fonction du type de tâche à 10° ($p > 0.44$).

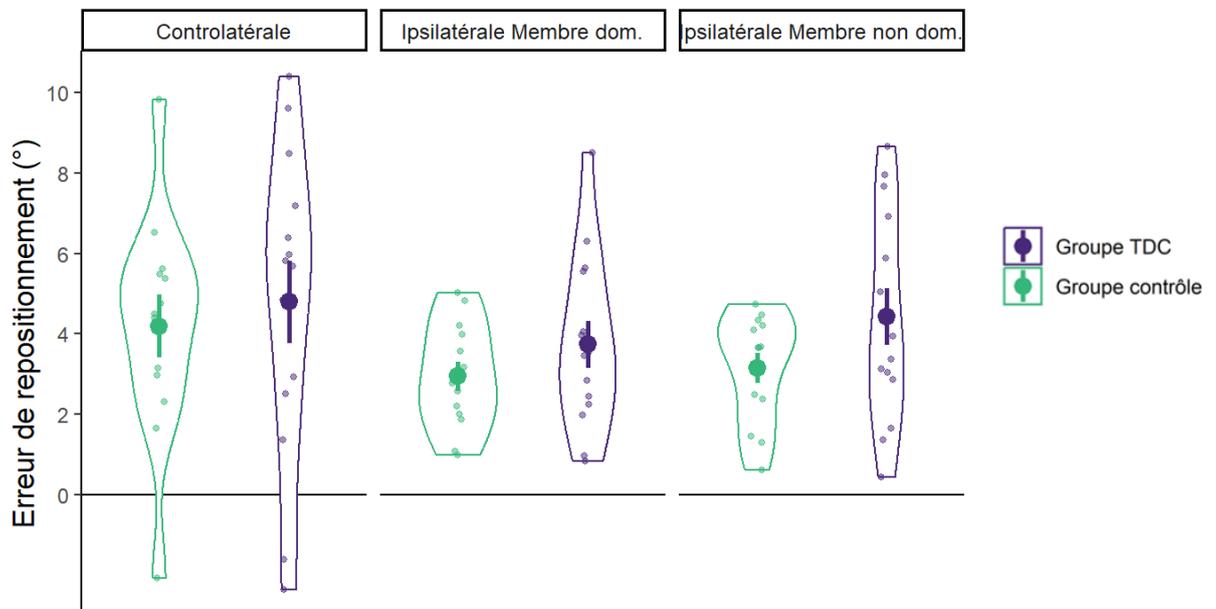


Figure 13. Erreurs de repositionnement de la tâche de repositionnement proprioceptif, en fonction du groupe et du type de tâche. Des valeurs positives indiquent une erreur au-dessus de la position cible (i.e. flexion de coude plus grande que la position cible). Conventions identiques à la Figure 9

Capacités d'imitation de gestes. Le groupe TDC montre des capacités d'imitation de gestes significativement moins élevées (moyenne = 60.6 ± 9.4) que le groupe contrôle (moyenne = 68.5 ± 3.6) ($t(17.10) = 2.90$, $p = 0.010$).

Performance de dextérité manuelle. Le groupe TDC est significativement plus lent (moyenne = $24.5 \text{ sec} \pm 4.1$) que le groupe contrôle (moyenne = $18.0 \text{ sec} \pm 2.2$), comme le montre l'effet principal du Groupe dans le MLM ($F(1) = 30.42$, $p < 0.001$).

La main dominante montre également de meilleures performances (moyenne = $20.7 \text{ sec} \pm 3.8$) que la main non dominante (moyenne = $22.0 \text{ sec} \pm 5.3$), comme le révèle l'effet principal de la Main ($F(1) = 7.14$, $p = 0.013$).

Capacités attentionnelles. Les capacités attentionnelles, évaluées par le questionnaire CAARS, sont significativement plus faibles dans le groupe TDC (moyenne = 37.8 ± 13.8) par rapport au groupe contrôle (moyenne = 23.1 ± 8.0) ($t(21.06) = -3.40$, $p = 0.003$).

4. Discussion

Dans cette étude, nous avons évalué les capacités de localisation de cibles somatosensorielles – proprioceptives ou proprio-tactiles – d’adultes présentant ou non un TDC. Nos résultats préliminaires concernant la tâche proprioceptive montrent une erreur verticale plus grande, seulement pour l’effecteur oculaire, chez les adultes avec un TDC par rapport aux adultes neurotypiques. En revanche, nous n’avons pas observé de différence de localisation de stimulations tactiles, que ce soit pour l’erreur horizontale ou verticale (seules les réponses manuelles ont été incluses dans cette analyse préliminaire de la tâche tactile).

L’erreur de localisation était également affectée par la position cible, dans les deux tâches : les erreurs étaient plus grandes dans la position cible de 10° par rapport à 30° dans la tâche proprioceptive (sur l’axe vertical, quelle que soit la condition ; sur l’axe horizontal, seulement pour l’effecteur oculaire et la durée d’encodage courte), et lorsque la stimulation était appliquée à l’index par rapport au pouce dans la tâche tactile (quelle que soit la durée d’encodage, sur l’axe horizontal et vertical).

La durée d’encodage avait également un effet sur les erreurs de localisation, avec un effet différent selon la tâche et l’axe de l’erreur. En effet, dans certaines conditions, la durée d’encodage courte menait à des erreurs plus importantes que la durée d’encodage longue : pour l’erreur horizontale, dans la tâche proprioceptive dans le groupe contrôle et pour la position cible de 10°, et dans la tâche tactile seulement pour la stimulation appliquée sur l’index ; pour l’erreur verticale, dans la tâche proprioceptive seulement en réponse oculaire et pour la position cible de 10°. En revanche, la durée d’encodage courte induisait des erreurs verticales plus petites que la durée d’encodage longue dans la tâche tactile ; la différence de moyennes d’erreur verticale entre ces deux conditions de durée d’encodage n’était néanmoins que de 2 millimètres.

Enfin, l’effecteur, dont l’effet n’a été investigué que dans la tâche proprioceptive, affectait l’erreur de localisation : sur l’axe horizontal, les erreurs oculaires étaient plus grandes que les erreurs manuelles seulement dans le groupe TDC, ou dans toute la population mais dans les conditions de 10° et pour la durée d’encodage courte. En revanche, les erreurs manuelles étaient plus petites que les erreurs oculaires sur l’axe vertical, mais seulement chez les adultes neurotypiques.

Etant donné le caractère préliminaire de ces analyses, les interactions ne seront pas discutées, exceptées lorsqu’elles signalent des différences entre les groupes.

Concernant les évaluations complémentaires, nous avons confirmé la persistance de difficultés motrices dans une tâche de dextérité manuelle, ainsi que d'altérations dans l'imitation de gestes chez les adultes présentant un TDC par rapport aux adultes neurotypiques. Nous avons également observé de moins bonnes performances visuospatiales chez les adultes présentant un TDC par rapport aux adultes neurotypiques, ainsi que de moins bonnes performances attentionnelles. Enfin, les seuils de détection et de discrimination tactiles semblaient similaires entre les populations TDC et neurotypique, tout comme les performances de repositionnement actif du coude.

Des déficits proprioceptifs chez les adultes présentant un TDC ?

Les adultes avec un TDC ont montré une moindre précision (en termes de biais) que les adultes neurotypiques pour localiser une cible proprioceptive, ceci seulement sur l'axe vertical et pour l'effecteur oculaire. Cette différence de précision pourrait témoigner d'une moins bonne capacité à évaluer la position angulaire du coude chez les adultes présentant un TDC en comparaison des adultes neurotypiques, révélant un déficit proprioceptif. Ce résultat serait en accord avec l'altération des capacités proprioceptives retrouvée au niveau du poignet par Tseng et al. (2022) chez des adultes présentant un TDC. Cependant, cette dernière étude rapportait seulement une variabilité des réponses plus importante chez les adultes avec un TDC, mais ne rapportait pas de différence de biais entre les deux populations. Dans notre étude, nous n'avons pas non plus retrouvé de différence entre les groupes concernant le biais pour l'effecteur manuel. Il conviendra d'évaluer la variabilité des réponses manuelles dans notre tâche lorsque la population TDC sera complète, pour confirmer la variabilité plus importante malgré un biais similaire, comme retrouvé par Tseng et collaborateurs (2022).

Un déficit, en termes de biais, a été retrouvé seulement lorsque l'effecteur était oculaire. Nous avons fait l'hypothèse opposée, c'est-à-dire une différence entre les groupes plus marquée pour l'effecteur manuel, du fait de l'imprécision motrice du membre supérieur chez les adultes avec un TDC, pouvant potentiellement se surajouter au déficit proprioceptif. Cette imprécision présente uniquement lors des réponses oculaires pourrait être plutôt liée à une altération des processus cérébraux de transformation de coordonnées de la cible. En effet, comme évoqué en introduction de ce manuscrit (cf. chapitre I.3.2), une cible somatosensorielle est encodée dans un cadre de référence centré sur le corps (Manson et al., 2019; McGuire & Sabes, 2009; Mueller & Fiehler, 2014) ; pour réaliser une saccade oculaire vers cette cible, le codage de celle-ci doit être transformé dans un cadre de référence oculo-centré, alors qu'une réponse manuelle ne

nécessite pas une telle transformation. Il a été montré que la transformation de coordonnées peut induire une augmentation du biais et de la variabilité des réponses motrices (Schlicht & Schrater, 2007). Si le déficit de localisation de cible proprioceptive affectant uniquement la réponse oculaire se confirme chez l'adulte avec un TDC, ceci pourrait donc témoigner d'une difficulté à transformer les coordonnées pour passer d'un cadre de référence centré sur le corps à un cadre de référence oculo-centré, amenant alors à des erreurs de localisation plus importantes dans cette modalité de réponse particulièrement. Cependant, ce déficit n'affectant que l'erreur verticale (et pas l'erreur horizontale), il pourrait finalement révéler un léger déficit proprioceptif : l'incertitude de la position de la cible sur l'axe vertical, déjà présente avant la transformation du fait d'un déficit à estimer la position angulaire du coude, pourrait être mise en exergue par la majoration de l'imprécision liée au changement de référentiel. Ainsi, le déficit proprioceptif serait trop léger pour être mis en évidence par l'effecteur manuel, mais serait révélé par l'effecteur oculaire.

Une précision préservée pour localiser une cible tactile

Au regard de nos résultats préliminaires, la précision de localisation d'une cible tactile semble similaire chez les adultes avec un TDC et les adultes neurotypiques. Ce résultat, en faveur d'une préservation des capacités tactiles, est en accord avec nos résultats observés chez les enfants avec un TDC, qui montraient déjà que la performance n'était altérée que sur l'axe horizontal et dans certaines conditions de position cible et de durée d'encodage. De plus, les performances tactiles des enfants TDC n'étaient pas corrélées avec leurs difficultés motrices. L'ensemble de ces résultats suggère que les performances tactiles ne sont pas altérées durablement dans le TDC, et qu'elles ne sont pas la cause majeure des difficultés de contrôle moteur retrouvées dans ce trouble.

Il est important de rappeler que seules les réponses de l'effecteur manuel ont été incluses dans cette analyse préliminaire des performances tactiles. Il sera intéressant d'investiguer les performances de l'effecteur oculaire chez les adultes avec un TDC lorsque l'analyse de la population sera terminée. En effet, si la performance de localisation de cible tactile est altérée pour la réponse oculaire uniquement, ceci serait en faveur d'une difficulté dans la transformation de coordonnées pour changer de référentiel, comme évoqué précédemment pour les informations proprioceptives. En revanche, si aucun déficit n'est retrouvé dans cette modalité de réponse, nous pourrions suggérer qu'il existe un déficit proprioceptif chez les adultes présentant un TDC, mais des capacités de localisation tactile préservées.

Une représentation du bras préservée chez l'adulte avec un TDC

Les deux populations montrent des erreurs moyennes sur l'axe horizontal dans la direction proximale (*i.e.* vers le coude), en accord avec les résultats retrouvés dans l'article de Naffrechoux et al. (2024) ; ceci suggère une distorsion de la représentation du bras, dans le sens d'une sous-estimation de sa longueur. Si les tâches de cette étude ne permettent pas d'investiguer directement la représentation de la longueur de l'avant-bras, les erreurs proximales, témoignant d'une sous-estimation de la distance de la cible somatosensorielle, reflètent probablement cette distorsion déjà bien documentée (Longo, 2022; Longo & Haggard, 2010; Matsumiya, 2022). Les deux groupes inclus dans notre étude montrant des performances similaires de localisation sur l'axe horizontal, la représentation de l'avant-bras ne semble pas perturbée chez les adultes avec un TDC. Pourtant, chez l'enfant, une altération des représentations corporelles a été suggérée dans le TDC, mise en évidence par une tâche de localisation du toucher (déjà présentée dans le chapitre IV.3.2., Gauduel et al., 2024) et par une tâche d'utilisation d'un outil visant particulièrement la plasticité des représentations corporelles pour l'action (Martel et al., 2022). Notre étude chez les enfants avec un TDC a également montré un déficit dans la localisation de cibles somatosensorielles sur l'axe horizontal, suggérant également une altération de la représentation de l'avant-bras chez les enfants avec un TDC. Il semblerait donc que ce déficit s'estompe, voire disparaisse au cours du développement, pour atteindre chez le jeune adulte des performances similaires aux adultes neurotypiques. Il serait intéressant d'investiguer d'autres aspects des représentations corporelles chez l'adulte présentant un TDC, et notamment leurs capacités de plasticité telles qu'elles ont été investiguées par Martel et collaborateurs. Ceci permettrait ainsi de préciser si certains aspects des représentations corporelles restent perturbés dans le TDC à l'âge adulte, ou si les perturbations sont compensées au cours du développement.

La position cible affecte l'erreur de localisation

Nous avons observé un effet de la position cible : les erreurs verticales étaient plus grandes pour la position de 10° par rapport à la position de 30° dans la tâche de localisation proprioceptive ; elles étaient également plus grandes lorsque la stimulation était appliquée à l'index par rapport au pouce dans la tâche de localisation tactile. Ceci confirme l'effet de la position cible déjà observé chez les adultes neurotypiques dans notre étude précédente (Naffrechoux et al., 2024). Il semble que pour l'articulation du coude, la précision (*i.e.* biais) d'estimation de l'angle du coude soit plus faible dans une position proche de l'extension maximale de l'articulation (dans

notre configuration, la position de 10°), en comparaison d'une position en milieu de course articulaire (correspondant ici à la position de 30° depuis la position initiale). Ces résultats sont également retrouvés dans les tâches ipsilatérales de repositionnement actif (cf. section 3.3.), classiquement utilisées pour évaluer l'acuité proprioceptive (Goble, 2010).

Concernant la tâche de localisation tactile, de même, l'erreur verticale plus grande lorsque la stimulation tactile se situe sur l'index en comparaison d'une stimulation appliquée sur le pouce a été décrite dans notre étude précédente chez l'adulte neurotypique (Naffrechoux et al., 2024). Ceci est en accord avec les distorsions des représentations corporelles affectant l'index de manière plus marquée que le pouce (Longo, 2017; Longo & Haggard, 2010).

Effet de la durée d'encodage et de l'effecteur : des résultats préliminaires à confirmer

Nos résultats préliminaires ont mis en évidence une erreur qui décroît lorsque la durée d'encodage est allongée. Cependant, cet effet n'est présent que dans certaines conditions : dans la tâche proprioceptive, il n'est révélé que dans le groupe contrôle pour la position cible de 10° concernant l'erreur horizontale, et seulement lors d'une réponse saccadique pour la position cible de 10° concernant l'erreur verticale. Dans la tâche tactile, il n'est présent que pour l'erreur horizontale et lorsque la stimulation est appliquée à l'index. A l'inverse, l'erreur verticale était plus grande lors de la durée d'encodage longue dans cette même tâche tactile, mais cette fois, la différence de moyennes d'erreur entre les deux conditions de durée d'encodage n'était que de 2 millimètres. Ces résultats n'ayant pas été retrouvés chez l'adulte neurotypique (Naffrechoux et al., 2024), il nous semble important d'attendre l'échantillon définitif pour conclure à un effet de la durée d'encodage.

Enfin, l'effet de l'effecteur décrit dans notre article précédent chez l'adulte neurotypique, menant à des erreurs oculaires plus grandes que les erreurs manuelles sur l'axe horizontal, n'a été retrouvé que dans certaines conditions (pour la position cible de 10° et la durée d'encodage courte ; ou seulement dans la population TDC). Notre population étant plus petite que la population incluse dans Naffrechoux et al. (2024), la puissance statistique est probablement trop faible dans la présente étude pour révéler cet effet de l'effecteur ; il nous paraît à nouveau préférable d'évaluer cet effet avec une population complète.

Evaluations complémentaires

Comme attendu, les difficultés motrices sont confirmées par les performances altérées dans les tâches de dextérité manuelle (pegboard) et d'imitation de gestes.

Concernant les évaluations complémentaires, nous n'avons pas retrouvé de déficit concernant les seuils de détection et de discrimination tactiles chez les adultes avec un TDC. Cependant, les *p-values* sont relativement basses (0.11 et 0.16) ; il sera donc intéressant de confirmer ou non cette absence de déficit dans une population plus importante. Si des déficits sont mis en évidence, alors qu'ils n'étaient pas présents chez l'enfant avec un TDC (cf. étude 2), une explication de l'apparition de ce déficit pourrait venir du métier exercé par les participants du groupe TDC. En effet, ceux-ci pratiquent plus souvent un métier manuel, du fait des difficultés scolaires éprouvées dans leur enfance, pouvant amener à une usure cutanée plus importante au niveau des doigts et augmentant ainsi les seuils de détection et de discrimination tactile.

Concernant les capacités visuo-spatiales, une différence est mise en évidence entre les populations TDC et neurotypiques chez l'adulte. Malgré cette différence statistique, les performances des adultes avec un TDC (score moyen = 62.5) sont relativement proches de celles du groupe neurotypique (score moyen = 67.1). A notre connaissance, il n'existe pas de normes établies pour ce test chez l'adulte, mais Pisella et al. (2013) rapportent un score total médian de 67 dans un groupe d'adultes neurotypiques, avec une limite basse 'outlier' calculée à 58. Tous les participants de notre groupe TDC obtiennent un score total supérieur à 58, évoquant donc plutôt des faiblesses visuo-spatiales sans qu'il n'y ait une performance pathologique.

Enfin, les capacités attentionnelles évaluées par un questionnaire auto-administré semblent plus faibles chez les adultes avec un TDC par rapport aux adultes neurotypiques ; il sera donc primordial d'investiguer le lien entre ces capacités attentionnelles et les performances de localisation de cibles somatosensorielles, à travers des tests de corrélations, pour vérifier si les déficits retrouvés dans nos tâches expérimentales ne peuvent pas être attribués à des erreurs d'inattention.

Comme évoqué précédemment, ces analyses constituent des résultats préliminaires. En effet, le recrutement des participants (avec ou sans TDC) n'est pas terminé et les données oculaires n'ont pas été incluses en totalité dans l'analyse. Si des déficits somatosensoriels sont retrouvés chez les adultes présentant un TDC, il sera intéressant d'évaluer par des analyses de corrélation

leur lien avec les difficultés motrices, ce qu'il n'a pas été possible de réaliser sur nos données préliminaires. De plus, l'analyse des données oculaires dans la tâche de localisation tactile sera particulièrement intéressante pour investiguer l'hypothèse de difficultés chez les adultes avec TDC lors de la transformation de coordonnées. Ceci permettrait ainsi de déterminer si l'imprécision retrouvée dans la tâche de localisation vient d'un déficit proprioceptif qui perdure à l'âge adulte ou d'un déficit du au changement de cadre de référence (alors que le déficit proprioceptif s'estompe avec le développement).

Le recrutement, ainsi que le traitement des données oculaires, seront donc poursuivis pour permettre de confirmer ou infirmer ces premiers résultats.

Références bibliographiques

Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1). <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>

Blank, R., Barnett, A. L., Cairney, J., Green, D., Kirby, A., Polatajko, H., Rosenblum, S., Smits-Engelsman, B., Sugden, D., Wilson, P., & Vinçon, S. (2019). International clinical practice recommendations on the definition, diagnosis, assessment, intervention, and psychosocial aspects of developmental coordination disorder. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 61(3), 242-285. <https://doi.org/10.1111/dmcn.14132>

Conners, C. K., Erhardt, D., & Sparrow, E. P. (1999). *Conners' adult ADHD rating scales (CAARS)*. Multi-Health Systems Inc. (MHS).

Cousins, M., & Smyth, M. M. (2003). Developmental coordination impairments in adulthood. *Human Movement Science*, 22(4-5), 433-459. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2003.09.003>

De Renzi, E., Motti, F., & Nichelli, P. (1980). Imitating gestures. A quantitative approach to ideomotor apraxia. *Archives of Neurology*, 37(1), 6-10. <https://doi.org/10.1001/archneur.1980.00500500036003>

Gauduel, T., Blondet, C., Gonzalez-Monge, S., Bonaiuto, J., & Gomez, A. (2024). Alteration of body representation in typical and atypical motor development. *Developmental Science*, 27(3), e13455. <https://doi.org/10.1111/desc.13455>

- Goble, D. J. (2010). Proprioceptive Acuity Assessment Via Joint Position Matching : From Basic Science to General Practice. *Physical Therapy*, 90(8), 1176-1184.
<https://doi.org/10.2522/ptj.20090399>
- Gras, D., Ploix Maes, E., Doulazmi, M., Huron, C., Galléa, C., Boespflug Tanguy, O., Germanaud, D., & Roze, E. (2023). Developmental coordination disorder subtypes in children : An unsupervised clustering. *Developmental Medicine & Child Neurology*, dmcn.15563. <https://doi.org/10.1111/dmcn.15563>
- Henderson, S. E., Sugden, D. A., & Barnett, A. L. (2007). *Movement assessment battery for children-2 : Movement ABC-2 : Examiner's manual* (Pearson).
- Hothorn, T., Bretz, F., & Westfall, P. (2008). Simultaneous inference in general parametric models. *Biometrical Journal. Biometrische Zeitschrift*, 50(3), 346-363.
<https://doi.org/10.1002/bimj.200810425>
- Hyde, C., Fuelscher, I., Buckthought, K., Enticott, P. G., Gitay, M. A., & Williams, J. (2014). Motor imagery is less efficient in adults with probable developmental coordination disorder : Evidence from the hand rotation task. *Research in Developmental Disabilities*, 35(11), 3062-3070. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2014.07.042>
- Hyde, C., Fuelscher, I., Williams, J., Lum, J. A. G., He, J., Barhoun, P., & Enticott, P. G. (2018). Corticospinal excitability during motor imagery is reduced in young adults with developmental coordination disorder. *Research in Developmental Disabilities*, 72, 214-224.
<https://doi.org/10.1016/j.ridd.2017.11.009>
- Job, X. E., Brady, D., de Fockert, J. W., Luft, C. D. B., Hill, E. L., & van Velzen, J. (2019). Adults with probable developmental coordination disorder selectively process early visual, but not tactile information during action preparation. An electrophysiological study. *Human Movement Science*, 66, 631-644. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2019.02.018>
- Katschmarsky, S., Cairney, S., Maruff, P., Wilson, P. H., & Currie, J. (2001). The ability to execute saccades on the basis of efference copy : Impairments in double-step saccade performance in children with developmental co-ordination disorder. *Experimental Brain Research*, 136(1), 73-78. <https://doi.org/10.1007/s002210000535>
- Kirby, A. (2011). The adult dcd/dyspraxia checklist (ADC) instructions for use (Kirby & Rosenblum, 2008) revision of scoring (2011). <https://dyspraxiaaction.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/10/the-adult-dcd-guidelines-2011.pdf>

- Kirby, A., Edwards, L., & Sugden, D. (2011). Emerging adulthood in developmental co-ordination disorder : Parent and young adult perspectives. *Research in Developmental Disabilities, 32*(4), 1351-1360. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.01.041>
- Kirby, A., Edwards, L., Sugden, D., & Rosenblum, S. (2010). The development and standardization of the Adult Developmental Co-ordination Disorders/Dyspraxia Checklist (ADC). *Research in Developmental Disabilities, 31*(1), 131-139. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2009.08.010>
- Kuznetsova, A., Brockhoff, P. B., & Christensen, R. H. B. (2017). lmerTest Package : Tests in Linear Mixed Effects Models. *Journal of Statistical Software, 82*, 1-26. <https://doi.org/10.18637/jss.v082.i13>
- Longo, M. R. (2017). Expansion of Perceptual Body Maps Near – But Not Across – The Wrist. *Frontiers in Human Neuroscience, 11*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00111>
- Longo, M. R. (2022). Distortion of mental body representations. *Trends in Cognitive Sciences, 26*(3), 241-254. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2021.11.005>
- Longo, M. R., & Haggard, P. (2010). An implicit body representation underlying human position sense. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 107*(26), 11727-11732. <https://doi.org/10.1073/pnas.1003483107>
- Manson, G. A., Blouin, J., Kumawat, A. S., Crainic, V. A., & Tremblay, L. (2019). Rapid online corrections for upper limb reaches to perturbed somatosensory targets : Evidence for non-visual sensorimotor transformation processes. *Experimental Brain Research, 237*(3), 839-853. <https://doi.org/10.1007/s00221-018-5448-3>
- Martel, M., Boulenger, V., Koun, E., Finos, L., Farnè, A., & Roy, A. C. (2022). Body schema plasticity is altered in Developmental Coordination Disorder. *Neuropsychologia, 166*, 108136. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2021.108136>
- Matsumiya, K. (2022). Multiple representations of the body schema for the same body part. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 119*(4), e2112318119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2112318119>
- McGuire, L. M. M., & Sabes, P. N. (2009). Sensory transformations and the use of multiple reference frames for reach planning. *Nature Neuroscience, 12*(8), 1056-1061. <https://doi.org/10.1038/nn.2357>

- Meachon, E. J., Beitz, C., Zemp, M., Wilmut, K., & Alpers, G. W. (2022). The adult developmental coordination disorders/dyspraxia checklist - German : Adapted factor structure for the differentiation of DCD and ADHD. *Research in Developmental Disabilities*, 126, 104254. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2022.104254>
- Mueller, S., & Fiehler, K. (2014). Effector movement triggers gaze-dependent spatial coding of tactile and proprioceptive-tactile reach targets. *Neuropsychologia*, 62, 184-193. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2014.07.025>
- Naffrechoux, M., Koun, E., Volland, F., Farnè, A., Roy, A. C., & Pélisson, D. (2024). Eyes and hand are both reliable at localizing somatosensory targets. *Experimental Brain Research*. <https://doi.org/10.1007/s00221-024-06922-8>
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness : The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97-113. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(71\)90067-4](https://doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4)
- Pisella, L., André, V., Gavault, E., Le Flem, A., Luc-Pupat, E., Glissoux, C., Barrière, A., Vindras, P., Rossetti, Y., & Gonzalez-Monge, S. (2013). A test revealing the slow acquisition and the dorsal stream substrate of visuo-spatial perception. *Neuropsychologia*, 51(1), 106-113. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2012.11.015>
- Pisella, L., Martel, M., Roy, A. C., Vuillerot, C., & Gonzalez-Monge, S. (2020). Validation of a simple screening test for elementary visuo-spatial perception deficit. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 63(4), 302-308. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2019.03.006>
- Schlicht, E. J., & Schrater, P. R. (2007). Impact of coordinate transformation uncertainty on human sensorimotor control. *Journal of Neurophysiology*, 97(6), 4203-4214. <https://doi.org/10.1152/jn.00160.2007>
- Smith, Y. A., Hong, E., & Presson, C. (2000). Normative and Validation studies of the Nine-Hole Peg Test with children. *Perceptual and Motor Skills*, 823-843. <https://doi.org/10.2466/pms.2000.90.3.823>
- Sumner, E., & Hill, E. L. (2024). Oculomotor differences in adults with and without probable developmental coordination disorder. *Frontiers in Human Neuroscience*, 18, 1280585. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2024.1280585>
- Sumner, E., Hutton, S. B., Kuhn, G., & Hill, E. L. (2018). Oculomotor atypicalities in Developmental Coordination Disorder. *Developmental Science*, 21(1), e12501. <https://doi.org/10.1111/desc.12501>

Tal Saban, M., & Kirby, A. (2018). Adulthood in Developmental Coordination Disorder (DCD) : A Review of Current Literature Based on ICF Perspective. *Current Developmental Disorders Reports*, 5(1), 9-17. <https://doi.org/10.1007/s40474-018-0126-5>

Tseng, Y.-T., Lin, Y.-H., Chen, Y.-W., Tsai, C.-L., & Chen, F.-C. (2022). Impaired wrist position sense is linked to motor abnormalities in young adults with a probable developmental coordination disorder. *Neuroscience Letters*, 136446. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2022.136446>

Wilmot, K., & Byrne, M. (2014). Grip selection for sequential movements in children and adults with and without Developmental Coordination Disorder. *Human Movement Science*, 36, 272-284. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2013.07.015>

Wilmot, K., Byrne, M., & Barnett, A. L. (2013). Reaching to throw compared to reaching to place : A comparison across individuals with and without Developmental Coordination Disorder. *Research in Developmental Disabilities*, 34(1), 174-182. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2012.07.020>

Wilmot, K., Wann, J. P., & Brown, J. H. (2006). Problems in the coupling of eye and hand in the sequential movements of children with Developmental Coordination Disorder. *Child: Care, Health and Development*, 32(6), 665-678. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2214.2006.00678.x>

DISCUSSION GÉNÉRALE

I. Synthèse des résultats

Dans le but de mieux comprendre le(s) mécanisme(s) à l'origine des difficultés motrices du TDC, l'objectif général de ce travail de thèse était d'explorer l'hypothèse de déficits perceptifs, et plus précisément de déficits somatosensoriels - proprioceptifs et tactiles – chez des enfants et adultes présentant un TDC. Pour cela, nous avons développé des tâches de localisation de cibles somatosensorielles, avec deux modalités de réponse - le pointage manuel et la saccade oculaire – l'une étant sujette à une imprécision motrice et l'autre étant préservée de cette imprécision dans le TDC. La comparaison de ces deux effecteurs pour localiser une cible somatosensorielle permettait donc de distinguer la composante perceptive (liée à la difficulté à localiser la cible) de la composante motrice (liée à la difficulté à exécuter un geste précis avec le membre supérieur).

Le premier objectif de ce travail de thèse était de comparer la précision d'un pointage manuel et d'une saccade oculaire, vers une cible proprioceptive ou proprio-tactile chez le sujet adulte neurotypique. Notre première étude a permis de mettre en évidence une plus grande imprécision de l'effecteur oculaire, sur l'axe horizontal uniquement, par rapport à l'effecteur manuel pour localiser une cible somatosensorielle, qu'elle soit proprioceptive ou proprio-tactile. Cette différence de précision pourrait être liée aux changements de cadre de référence impliquant des transformations de coordonnées de la cible pour répondre avec l'effecteur oculaire. Malgré cette différence de précision, nous avons pu observer une corrélation entre les réponses oculaires et les réponses manuelles, suggérant que les deux effecteurs accèdent à des représentations corporelles similaires. De plus, nous avons montré que la position de la cible affectait la réponse de manière semblable, quel que soit l'effecteur : les erreurs de localisation étaient plus grandes lorsque l'angle du coude était proche de l'extension maximale en comparaison d'une position plus fléchie, et elles étaient également plus grandes lorsqu'une stimulation tactile était appliquée à l'index en comparaison d'une stimulation sur le pouce. Enfin, la durée d'encodage de la cible (correspondant à la durée en position statique pour la tâche proprioceptive et à la durée de la vibration pour la tâche tactile) n'a pas montré d'effet sur la précision de la localisation, et ce quel que soit l'effecteur utilisé. L'ensemble de ces résultats a permis de confirmer la pertinence d'utiliser l'effecteur oculaire pour évaluer des capacités somatosensorielles, lorsque l'effecteur manuel est perturbé, comme dans le cas du TDC. Cette étude a également suggéré que la transformation des coordonnées pour utiliser l'effecteur oculaire en réponse à une stimulation somatosensorielle pouvait augmenter la taille des erreurs

de localisation, facteur qu'il sera important de considérer dans l'interprétation des performances chez l'individu présentant un TDC.

Notre deuxième objectif était de déterminer si des déficits proprioceptifs et/ou tactiles étaient présents chez l'enfant avec un TDC, et le cas échéant d'investiguer le lien entre ces déficits et les difficultés motrices. En outre, l'investigation des potentiels déficits somatosensoriels avait pour but d'en préciser la nature, à savoir évaluer s'il s'agissait d'une imprécision des afférences ou d'un ralentissement du traitement de l'information. La deuxième étude de ce travail a mis en exergue une imprécision plus importante de la localisation d'une cible proprioceptive chez les enfants avec un TDC par rapport aux enfants au développement typique. Cette différence entre les deux populations était présente quel que soit l'effecteur, manuel ou oculaire, et concernait à la fois l'erreur horizontale et l'erreur verticale. De plus, les capacités de localisation de la cible par l'effecteur oculaire étaient corrélées aux difficultés motrices (*i.e.* sous-scores du MABC-2) dans le domaine de l'équilibre et d'activités de balles chez les enfants présentant un TDC : plus les déficits proprioceptifs étaient importants, plus les difficultés motrices dans ces domaines étaient sévères. En revanche, les difficultés de dextérité manuelle ne corrélaient pas avec les capacités proprioceptives. Enfin, aucun effet de la durée d'encodage n'a été retrouvé. Ces résultats suggèrent donc un déficit proprioceptif de type imprécision (et non pas un ralentissement du traitement de l'information) chez les enfants avec TDC.

Concernant la modalité tactile, une imprécision de la localisation de la cible a été mise en évidence seulement sur l'axe horizontal, et dans certaines conditions de réponse (de position et de durée de la stimulation tactile). Notamment, les enfants avec un TDC faisaient des erreurs plus grandes sur l'axe horizontal que les enfants du groupe contrôle, lorsque la stimulation était appliquée sur l'index pendant une durée courte. Une stimulation plus longue (1.5sec *versus* 0.2sec) permettait aux enfants avec un TDC d'améliorer leur performance jusqu'à un niveau non significativement différent des enfants neurotypiques, suggérant un possible ralentissement du traitement de l'information tactile. Par ailleurs, ces performances de localisation de cible tactile ne corrélaient pas avec les performances motrices chez les enfants présentant un TDC. Les capacités tactiles semblent donc peu altérées dans le TDC, et ce déficit discret ne semble pas lié à la sévérité des difficultés motrices.

Enfin, ce travail avait pour objectif d'explorer la persistance possible de ces déficits somatosensoriels chez l'adulte présentant un TDC, ainsi que leur lien avec les difficultés motrices. L'inclusion de participants (avec ou sans TDC) ainsi que le traitement des données oculaires sont encore en cours pour cette troisième étude ; actuellement, 14 participants avec TDC et 13 participants contrôles ont pu être inclus. L'analyse présentée dans ce manuscrit comprend les données manuelles de 25 participants (13 avec TDC et 12 contrôles) et les données oculaires de 16 participants (8 par groupe) pour la tâche de localisation proprioceptive ; pour la tâche de localisation tactile, seules les données de réponse manuelle des 27 participants (14 avec TDC et 13 contrôles) ont été incluses dans l'analyse. Nos résultats préliminaires montrent une absence de déficit de localisation de cible proprioceptive sur l'axe horizontal chez les adultes avec un TDC. Seule la localisation sur l'axe vertical semble perturbée, et uniquement pour l'effecteur oculaire. Aucune différence n'a été mise en évidence entre les adultes avec et sans TDC dans la tâche de localisation tactile (effecteur manuel seulement). Ces résultats pourraient témoigner d'un léger déficit proprioceptif chez les adultes avec un TDC, révélé uniquement dans la condition la plus complexe et peut-être la plus sensible, à savoir la condition de réponse oculaire. Mais ces résultats pourraient également mettre en évidence, chez les adultes avec un TDC, une difficulté à transformer les coordonnées d'une cible d'un référentiel corpo-centré à un référentiel oculo-centré. L'analyse des données oculaires dans la tâche tactile permettra d'apporter des arguments en faveur de l'une ou l'autre hypothèse.

II. Pointage *versus* saccade vers une cible somatosensorielle

Dans notre première étude chez des adultes neurotypiques, nous avons pu comparer la précision d'un pointage - réalisé sans restriction des mouvements oculaires - et d'une saccade, vers des cibles somatosensorielles. Nous avons mis en évidence des erreurs de l'effecteur oculaire plus grandes que celles de l'effecteur manuel sur l'axe horizontal. Ces résultats sont consistants avec ceux retrouvés par Goettker et al. (2020) qui rapportaient également des erreurs oculaires plus importantes que les erreurs manuelles. Cette plus grande imprécision de l'effecteur oculaire, en comparaison de l'effecteur manuel, pourrait provenir de la transformation de coordonnées nécessaire pour effectuer une saccade somatosensorielle : la cible est codée dans un référentiel corpo-centré, les coordonnées doivent donc être transformées dans un cadre de référence oculo-centré pour programmer la saccade ; en revanche, localiser la cible somatosensorielle et effectuer un pointage manuel vers cette cible sont deux processus pouvant être réalisés dans le

même référentiel corpo-centré (Andersen & Cui, 2009; Buneo et al., 2002; Manson et al., 2019; McGuire & Sabes, 2009; Mueller & Fiehler, 2014). Nous n'avons pas observé cet effet de l'effecteur dans la population d'adultes contrôles de l'étude 3, mais ceci pourrait être dû à la faible taille d'échantillon (les données oculaires de 22 participants ont été incluses dans l'étude 1, mais seulement celles de 8 dans le groupe contrôle de l'étude 3).

Un résultat de la première étude particulièrement utile pour la suite de ce travail était la corrélation entre les réponses oculaires et les réponses manuelles pour localiser une cible somatosensorielle. Il semble donc que, outre la transformation de coordonnées nécessaire à la réponse oculaire, les deux effecteurs accèdent aux mêmes informations perceptives. En plus de ces corrélations, nous avons observé un effet de la position cible, qui était présent quel que soit l'effecteur : dans la tâche proprioceptive, les erreurs verticales étaient plus larges pour la position cible de 10° par rapport à la position cible de 30°. Un effet de l'angle du coude sur la taille des erreurs de repositionnement avait déjà été observé dans des études précédentes (Adamo et al., 2007; Goble & Brown, 2010). Dans la tâche tactile, les erreurs verticales étaient plus grandes lorsque la stimulation était appliquée à l'index par rapport au pouce, en accord avec les représentations corporelles moins distordues pour le pouce que pour les autres doigts (Longo, 2017; Longo & Haggard, 2010). Ces effets des positions cibles ont d'ailleurs été retrouvés dans toutes les populations testées dans ce travail - enfants ou adultes, avec ou sans TDC ; ils semblent donc assez robustes.

Enfin, nous avons pu observer des erreurs verticales dans des directions opposées dans les deux tâches de localisation : les participants estimaient la position de la cible trop basse par rapport à sa position réelle dans la tâche tactile, alors qu'ils l'estimaient trop haute dans la tâche proprioceptive. Goettker et collègues (2020) avaient retrouvé des résultats similaires dans leur tâche de localisation de cibles somatosensorielles : ils ont observé des erreurs en sous-estimation de la distance de la cible (*i.e.* proximales) lorsque les informations statesthésiques seules ou statesthésiques et tactiles étaient disponibles, alors que les réponses surestimaient la position de la cible (*i.e.* erreurs distales en moyenne) dès lors que les informations kinesthésiques étaient présentes. Notons qu'ils ont observé cette différence sur l'erreur dans le plan sagittal, c'est-à-dire dans le sens du mouvement du bras cible dans la condition kinesthésique ; l'inversion de direction de l'erreur dans nos tâches était retrouvée sur l'erreur verticale, correspondant également à la direction du mouvement du bras cible. Les chercheurs ont expliqué cette différence de direction de l'erreur par la dérive proprioceptive

(*'proprioceptive drift'*), liée à la dégradation des informations au cours du temps de maintien du membre en position statique : ils ont en effet rapporté une erreur de localisation de plus en plus proximale au fil des essais dans les conditions sans kinesthésie (que l'information tactile soit présente ou non). La dérive proprioceptive est en effet connue pour intervenir lorsque le membre est en position statique ; les erreurs de pointage vers une cible proprioceptive sont alors de plus en plus proximales (Wann & Ibrahim, 1992) et se rapprochent de la ligne médiane (Batikh et al., 2024). Si un mouvement actif du doigt cible (Wann & Ibrahim, 1992) ou du bras (Goettker et al., 2020) semble permettre d'éviter ou de limiter la progression de cette dérive, les stimulations tactiles appliquées sur le doigt cible n'empêchent pas la présence de celle-ci (Goettker et al., 2020). Dans le cas de notre étude, cette dérive pourrait donc intervenir de manière plus marquée dans la tâche de localisation tactile, dans laquelle l'avant-bras est statique pendant toute la tâche. Dans la tâche proprioceptive, bien que le mouvement de flexion du coude soit passif, la dérive pourrait être limitée (voire inexistante puisque nous n'avons pas retrouvé de différence d'erreurs entre la durée d'encodage de 2 secondes et celle de 4 secondes). Nos résultats viennent donc compléter ceux de Goettker et al. (2020) : il semble que le mouvement, qu'il soit passif (dans notre tâche proprioceptive) ou actif (dans la tâche de Goettker et collègues), entraîne des effets similaires sur la localisation de la cible en décalant les réponses plus loin que la cible (dans le sens du mouvement effectué par le bras cible pour rejoindre la position cible), par rapport à une condition où le bras cible est statique. De plus, nous pouvons ajouter que cet effet semble également présent sur les réponses oculaires, alors que Goettker et al. ne l'avaient étudié que sur les réponses de pointage manuel. La composante de mouvement, même passif, dans la tâche de localisation proprioceptive pourrait donc avoir une importance dans la précision de la localisation de la cible, quel que soit l'effecteur.

Au total, ces résultats de notre première étude ont mis en évidence la possibilité d'utiliser l'effecteur oculaire, lorsque l'effecteur manuel est imprécis comme dans le cas du TDC, pour investiguer des capacités proprioceptives ou tactiles. Ils ont également permis de confirmer l'imprécision majorée de l'effecteur oculaire (par rapport à l'effecteur manuel) pour localiser une cible somatosensorielle, du fait de la transformation des coordonnées ; cet élément, bien qu'il soit présent chez les adultes neurotypiques, devra être considéré dans l'interprétation des résultats, puisque l'intégrité des capacités de changement de référentiel ne semble pas avoir été étudiée dans le TDC.

III. Capacités perceptives somatosensorielles dans le TDC

III.1. Déficits proprioceptifs

III.1.1. Retard ou déficit permanent ?

Nous avons observé un déficit de localisation proprioceptive chez les enfants avec un TDC : en effet, leurs erreurs de localisation (horizontales et verticales) étaient plus grandes que celles des enfants au développement typique, quel que soit l'effecteur utilisé. Autrement dit, même en utilisant un effecteur - le système saccadique - qui n'est pas sujet à une imprécision d'exécution motrice, les enfants avec un TDC se montrent moins précis que les enfants au développement typique pour localiser une cible proprioceptive. Cette différence entre les deux populations est en faveur d'un déficit proprioceptif chez les enfants avec un TDC. Comme décrit en introduction, ce déficit proprioceptif avait déjà été suggéré par différentes études, mais les paradigmes utilisés comportaient des facteurs confondants : une réponse active du membre supérieur était parfois utilisée (dans des tâches de pointage ou de repositionnement), alors que cet effecteur est imprécis dans le TDC (Loftesnes et al., 2017; Tseng et al., 2018; Tseng, Tsai, et al., 2019). L'étude de Chen et al. (2020) sur la proprioception du membre inférieur des enfants avec un TDC avait proposé une tâche de repositionnement passif, permettant d'éviter ce facteur moteur confondant, mais n'avait réalisé qu'une tâche ipsilatérale, impliquant ainsi la mémoire de travail, possiblement également altérée dans le TDC (Alloway & Temple, 2007; Lachambre et al., 2021; Piek et al., 2007; Tsai et al., 2012; Wilson et al., 2013). De plus, elle ne s'intéressait qu'au membre inférieur, et il semblait nécessaire d'investiguer également l'acuité proprioceptive du membre supérieur sans biais d'interprétation lié à l'imprécision motrice. Notre tâche de localisation proprioceptive permettait d'éviter ce biais en proposant une réponse saccadique en plus d'une réponse manuelle, et n'avait pas de composante de mémoire de travail. L'imprécision des enfants avec un TDC révélée par cette tâche, présente avec les deux effecteurs, suggère donc des déficits proprioceptifs dans cette population. Ces moindres performances proprioceptives des enfants avec un TDC ne semblent pas être expliquées par un éventuel déficit attentionnel, puisqu'aucune corrélation n'a été retrouvée entre les erreurs de l'effecteur oculaire et le score d'attention (ni dans la population totale, ni dans chaque groupe séparément). Considérés ensemble, ces résultats sont donc en faveur d'une imprécision des informations proprioceptives du membre supérieur chez l'enfant avec un TDC.

Chez l'adulte avec un TDC, nous n'avons pas retrouvé de déficit si marqué dans des tâches identiques. En effet, les résultats préliminaires de l'étude 3 montrent des erreurs de localisation plus grandes chez les adultes présentant un TDC que chez les adultes neurotypiques, seulement sur l'axe vertical et pour l'effecteur oculaire. Si ces résultats se confirment avec un échantillon complet, ils pourraient être expliqués par la transformation de coordonnées, déjà évoquée précédemment, nécessaire pour répondre avec l'effecteur oculaire pour passer d'un cadre de référence corpo-centré à un cadre de référence oculo-centré. Nous suggérons deux hypothèses d'interprétation : la transformation de coordonnées est déficitaire chez les individus présentant un TDC, et c'est celle-ci qui mène à une différence significative de l'erreur de localisation entre adultes avec TDC et adultes neurotypiques. Dans ce cas, la cible proprioceptive serait correctement codée dans un cadre de référence centré sur le corps, mais la transformation des coordonnées de la cible dans un cadre de référence oculo-centré, pour effectuer une saccade, induirait une imprécision plus importante chez les adultes avec TDC par rapport aux adultes neurotypiques. Cette réponse oculaire montrerait alors une erreur plus grande dans la population TDC que dans la population typique. Mais ceci n'expliquerait pas pourquoi l'imprécision du groupe TDC n'est retrouvée que sur l'axe vertical. Une hypothèse alternative pourrait également expliquer ce déficit de localisation des adultes avec TDC avec l'effecteur oculaire : il est possible que le déficit de localisation d'une cible proprioceptive chez les adultes avec TDC soit déjà présent pour la réponse manuelle, mais trop discret pour être mis en évidence sur une population aussi restreinte (seulement 13 participants avec TDC et 12 participants contrôles ont été inclus dans notre analyse préliminaire). En effet, même si elle n'est pas significative, nous pouvons remarquer que la différence d'erreur moyenne entre les deux groupes pour l'effecteur manuel (de l'ordre de 0.8cm) est en faveur de moins bonnes performances pour le groupe TDC. Ce possible déficit de localisation proprioceptive relativement léger pourrait alors être exacerbé et ainsi révélé uniquement dans le cas de la réponse oculaire. En effet, il est décrit que la transformation de coordonnées augmente l'imprécision de localisation (Abedi Khoozani et al., 2020; Abedi Khoozani & Blohm, 2018) ; nous pouvons imaginer que cette imprécision liée au changement de référentiel est majorée chez les adultes présentant un TDC, pour lesquels il y a déjà une plus grande incertitude de la position de la cible, même sans changement de référentiel. Si cette incertitude est liée à une imprécision des informations proprioceptives, l'erreur verticale, suggérée comme reflétant l'estimation de l'angle de flexion du coude, serait alors particulièrement affectée par la transformation de coordonnées. Ces résultats chez l'adulte avec un TDC étant préliminaires, les interprétations seront à reconsidérer lorsque l'analyse sera terminée.

III.1.2. Imprécision ou ralentissement du traitement de l'information proprioceptive ?

Un second objectif était de préciser la nature du déficit proprioceptif éventuel : nous avons ainsi manipulé la durée d'encodage, correspondant dans la tâche de localisation proprioceptive à la durée pendant laquelle l'avant-bras était maintenu en position cible avant la réponse du participant. En augmentant cette durée, ceci permettait de laisser plus de temps pour traiter l'information proprioceptive de la position de l'avant-bras. Ainsi, nous avons fait l'hypothèse que si le traitement de l'information était ralenti dans le TDC (mais pas nécessairement imprécis), les individus avec un TDC pourraient améliorer leur performance de localisation lorsqu'ils auraient plus de temps pour traiter cette information. Nous n'avons observé aucun effet de cette durée d'encodage chez les enfants avec un TDC dans la tâche de localisation proprioceptive. Chez les adultes avec un TDC, nos résultats préliminaires semblent également montrer que la durée d'encodage n'aurait pas d'effet sur la précision de la localisation. Ceci suggère que laisser plus de temps pour traiter l'information de la position statique du bras ne permet pas aux individus avec un TDC de mieux le localiser.

Une autre manière d'investiguer un possible ralentissement du traitement était de s'intéresser aux latences des réponses oculaires et manuelles, et à la durée des mouvements de pointage. Concernant les saccades, si leur latence s'était avérée plus importante dans les populations TDC par rapport aux populations contrôles - alors que les latences des saccades oculaires vers des cibles visuelles sont similaires entre les deux populations (Sumner et al., 2018) - nous aurions pu également supposer un ralentissement du traitement de l'information proprioceptive. Cependant, les données oculaires de fixation sur le point de départ ne sont pas suffisamment fiables chez l'enfant, du fait de la configuration du dispositif : les participants regardent le point de fixation situé sur la table dans une position extrême de la zone d'enregistrement des mouvements oculaires, avec souvent une fermeture partielle des paupières, ce qui ne permet pas d'enregistrer un signal fiable sur ce point de départ. Nous avons donc beaucoup de données oculaires manquantes dans les populations d'enfants (TDC et typique) concernant les latences des saccades. Concernant les réponses manuelles, l'analyse de leur latence et de leur durée ne semble pas pertinente à notre sens, puisque celles-ci pourraient être augmentées du fait de la lenteur générale d'exécution motrice des membres dans le TDC (Biancotto et al., 2011; Henderson et al., 1992; Hyde & Wilson, 2011a; Mon-Williams et al., 2005; Plumb et al., 2008), sans qu'elles ne soient liées à un ralentissement spécifique du traitement de l'information proprioceptive. Il aurait alors fallu réaliser une tâche complémentaire de temps de réaction à un

stimulus d'une autre modalité (visuelle ou auditive par exemple), mais les tâches étant déjà longues, il nous semblait difficile d'imposer une tâche supplémentaire aux enfants. Les données oculaires des adultes de l'étude 3 semblent utilisables pour réaliser l'analyse évoquée précédemment sur les temps de réaction des saccades dans notre tâche de localisation proprioceptive ; cette analyse est prévue lorsque l'effectif sera complet.

Au vu de l'ensemble de nos résultats, il apparaît donc qu'un déficit proprioceptif, menant à des afférences inexactes, est présent chez les enfants avec un TDC. Ce déficit semble s'estomper avec le développement pour devenir plus discret chez l'adulte avec un TDC ; ceci sera à confirmer lorsque le recrutement sera terminé dans cette troisième étude. Il sera également intéressant d'investiguer la variabilité de l'erreur chez les enfants et les adultes présentant un TDC. En effet, il a été montré que l'amélioration proprioceptive liée au développement se traduit par une diminution de la variabilité chez l'adulte par rapport à l'enfant et l'adolescent typique, alors que le biais est similaire entre 5 et 25 ans pour une tâche de repositionnement actif du coude (Holst-Wolf et al., 2016). Un déficit proprioceptif lié à un retard de développement des informations proprioceptives dans le TDC pourrait alors s'exprimer sur la variabilité de l'erreur plutôt que sur l'erreur moyenne. Enfin, il serait également pertinent d'investiguer les capacités proprioceptives des individus avec un TDC dans une étude longitudinale ou dans une étude impliquant différents groupes d'âge, pour en évaluer l'évolution au cours du développement.

III.1.3. Quel lien entre les déficits proprioceptifs et les difficultés motrices ?

Après avoir décrit la présence d'un déficit proprioceptif chez les enfants avec un TDC, nous avons voulu déterminer le lien entre celui-ci et les performances motrices de ces enfants. Nous avons alors retrouvé, chez les enfants avec un TDC, des corrélations significatives entre les erreurs de l'effecteur oculaire (non soumis à une imprécision motrice) et les sous-scores du MABC-2 dans les domaines de 'Viser et attraper' et 'Equilibre', alors que les performances proprioceptives n'étaient pas corrélées au sous-score de 'Dextérité manuelle'. En revanche, lorsque nous nous intéressons aux erreurs de l'effecteur manuel, nous n'avons pas retrouvé de corrélations avec les performances motrices (excepté pour les performances de dextérité manuelle mais la corrélation ne résistait pas à la correction pour corrélations multiples).

Chen et collaborateurs (2020) avaient déjà rapporté un lien entre un déficit proprioceptif du membre inférieur et les performances d'équilibre des enfants présentant un TDC. Cette relation entre acuité proprioceptive, notamment au niveau de la cheville, et équilibre est bien documentée dans différentes populations. Par exemple, l'acuité proprioceptive de la cheville est corrélée aux performances d'équilibre chez les adultes neurotypiques jeunes et âgés (Chen & Qu, 2019; Deshpande et al., 2016; Ko et al., 2016). De plus, le déclin proprioceptif lié à l'âge au niveau de la cheville (mais aussi au niveau de la hanche) représente un facteur de risque de chutes (Chen & Qu, 2019). Dans le cas de pathologie, par exemple après un AVC, l'acuité proprioceptive de la cheville est un prédicteur des performances d'équilibre chez les patients (Cho & Kim, 2021). Enfin, chez les sportifs de haut niveau, l'acuité proprioceptive de la cheville est également liée aux performances sportives, dont les performances d'équilibre (Han et al., 2015). Le lien entre le déficit proprioceptif du membre inférieur et les performances d'équilibre retrouvé par Chen et al. (2020) chez les enfants avec un TDC paraît totalement cohérent avec ces données de la littérature. Au-delà de cette relation avec la proprioception du membre inférieur, nous avons mis en évidence, chez les enfants avec un TDC, que plus l'acuité proprioceptive au niveau du membre supérieur était altérée, moins bonnes étaient leurs performances d'équilibre. Cette relation avait déjà été suggérée par Tseng et al. (2018) et Tseng, Tsai, et al. (2019), qui avaient retrouvé une corrélation entre les variabilités d'erreur de repositionnement du coude et du poignet et les performances d'équilibre, mais seulement dans la population totale (TDC et contrôle), et avec un protocole impliquant le facteur moteur confondant déjà évoqué. Nos résultats ne souffrent pas de ces critiques et sont néanmoins consistants avec les résultats de ces auteurs ; pris ensemble, ils sont en faveur d'une relation relativement robuste entre performances proprioceptives et performances d'équilibre. Un lien direct entre proprioception du membre supérieur et équilibre ne paraît pas évident, ce qui tend à suggérer que le déficit proprioceptif est généralisé chez ces enfants, affectant le corps dans sa globalité.

Chez les enfants au développement typique, nous avons également retrouvé une corrélation entre les performances d'équilibre et les erreurs de localisation proprioceptive, mais dans cette population seulement pour l'effecteur manuel (avec une tendance pour l'effecteur oculaire, la p-value non corrigée étant de 0.06). Les performances d'équilibre étaient évaluées par le MABC-2 où un effet plafond semble présent pour les enfants au développement typique, particulièrement pour ce sous-score (Smits-Engelsman et al., 2020), pouvant expliquer en partie

l'absence de significativité pour l'une des corrélations. Une mesure plus sensible des performances d'équilibre permettrait peut-être de mettre en évidence ces corrélations.

Nous avons également pu mettre en évidence un lien entre les erreurs de localisation proprioceptive de l'effecteur oculaire et les performances de viser et attraper chez les enfants avec un TDC : plus l'acuité proprioceptive du membre supérieur était altérée, plus les compétences de balles étaient déficitaires. A nouveau, cette corrélation entre acuité proprioceptive (*i.e.* variabilité des erreurs de repositionnement du poignet dans cette étude) et compétences de balles avait été décrite par Tseng et al. (2018) mais uniquement dans la population totale. Dans ce type de tâche, la vision est primordiale pour localiser la cible à viser, ou la balle à attraper. Une corrélation entre les performances visuo-spatiales et le score de viser et attraper a en effet été mis en évidence dans une étude précédente (Cheng et al., 2014). Mais il semble également que les afférences proprioceptives soient utiles pour réaliser avec succès ce type d'activités. Il est possible que, si les informations visuelles sont focalisées principalement sur la cible, les informations provenant d'une autre modalité sensorielle sont nécessaires pour guider le mouvement du bras. Dans une tâche de lancer de balles par exemple, nous pouvons en effet imaginer que le bras ne se trouve pas nécessairement dans le champ visuel, lors de l'armement du bras par exemple ; les informations proprioceptives seraient alors utilisées pour estimer la position initiale de la main avant le lancer, et ajuster la trajectoire notamment en début de mouvement lorsqu'il n'y a pas de vision du bras. Cette corrélation n'a en revanche pas été retrouvée chez l'enfant au développement typique (comme dans l'étude de Tseng et al., 2018). Ce résultat pourrait donc suggérer qu'un niveau minimum d'acuité proprioceptive est requis pour montrer de bonnes habiletés dans les activités de balle, mais qu'à partir d'un certain niveau, d'autres paramètres sont mis en jeu et il n'y a alors plus de relation linéaire entre proprioception et performances motrices.

Enfin, nous n'avons pas mis en évidence de corrélation entre les erreurs oculaires de localisation proprioceptive et les performances de dextérité manuelle dans le groupe TDC, suggérant que le déficit d'acuité proprioceptive du membre supérieur chez les enfants avec un TDC ne prédit pas l'altération de la dextérité manuelle. Les activités de dextérité manuelle proposées dans le MABC-2 ne sont que des tâches réalisées sous contrôle visuel ; les informations proprioceptives ne semblent donc pas primordiales dans ce type d'activités ou peuvent être au moins partiellement compensées par la présence d'informations visuelles. Chez les patients

désafférentés, des tâches de dextérité manuelle semblent en effet réalisables en laboratoire et lorsque la vision est disponible ; les difficultés motrices sont en revanche décrites sur des activités de dextérité manuelle dans le quotidien car la présence des informations visuelles nécessaires pour que la tâche soit correctement réalisée est difficile à garantir dans un environnement ordinaire (Rothwell et al., 1982). Les performances visuo-spatiales (évaluées avec le test PVSE) ont déjà montré un lien avec les performances de dextérité manuelle chez les enfants avec un TDC (Pisella et al., 2021). L'absence de corrélation dans notre étude entre proprioception et dextérité manuelle ne permet cependant pas d'exclure un rôle de ces capacités proprioceptives dans les performances de motricité fine altérées chez l'enfant avec un TDC : puisque plusieurs compétences (dont les performances visuospatiales) peuvent être impliquées dans les performances de dextérité manuelle dans le TDC, la taille d'effet de chacune des entrées sensorielles est peut-être relativement faible, réduisant la puissance statistique de notre test de corrélation pour lequel la taille d'échantillon était faible (n=12). Nous pouvons également suggérer que l'absence de corrélation est en lien avec les tâches proposées dans le sous-score de dextérité manuelle du MABC-2. En effet, trois tâches sont proposées pour les catégories d'âge incluses dans notre étude : une tâche de pegboard, une tâche de construction et une tâche de tracé. Si la tâche de pegboard est une tâche classique d'évaluation de la dextérité manuelle, la tâche de construction (enfiler un lacet dessus-dessous sur une planchette pour les 9-10 ans, ou construire un triangle avec des tiges plates, des écrous et des boulons pour les 11-12 ans) fait nécessairement appel aux capacités visuo-spatiales. Il a également été suggéré, dans une étude en IRMf, que les enfants avec un TDC s'appuient sur le traitement visuospatial pour réaliser une tâche de tracé (Zwicker et al., 2010). Ainsi, une autre tâche de dextérité manuelle aurait peut-être permis de révéler un lien entre déficits d'acuité proprioceptive et de motricité fine chez ces enfants.

Au total, il semble donc que les liens entre déficits perceptifs et performances motrices dépendent du domaine moteur dans lequel ces dernières sont mesurées : en effet, si les performances visuo-spatiales semblent avoir un lien avec les performances de dextérité manuelle chez les enfants avec un TDC (Pisella et al., 2021), nos résultats indiquent que le déficit proprioceptif est en lien avec les difficultés d'équilibre et de viser/attraper. Nos résultats ne permettent cependant pas de réfuter un éventuel lien entre l'acuité proprioceptive et les performances de dextérité manuelle.

Enfin, les performances visuo-spatiales et les erreurs de localisation proprioceptive mesurées par l'effecteur oculaire (considérées ici comme le reflet de l'acuité proprioceptive sans facteur moteur confondant) ne sont pas corrélées. Ce résultat pourrait indiquer que la sévérité du déficit perceptif dans une modalité (visuelle ou proprioceptive) ne prédit pas la sévérité dans l'autre modalité. Puisque les déficits visuels et les déficits proprioceptifs prédisent des difficultés motrices dans des domaines moteurs différents, ceci pourrait également expliquer l'hétérogénéité des troubles moteurs retrouvés dans le TDC. En effet, un enfant particulièrement sujet à des déficits visuo-spatiaux pourrait être en difficulté principalement dans les activités de dextérité manuelle, et particulièrement celles requérant un contrôle visuel, tandis qu'un enfant ayant des déficits majeurs d'ordre proprioceptif serait plutôt affecté pour les activités de motricité globale (équilibre et lancer notamment). Cette interprétation doit cependant être considérée avec précaution, car l'absence de corrélation pourrait venir d'un manque de puissance statistique. Il serait intéressant d'évaluer simultanément ces deux capacités perceptives dans des populations d'individus avec TDC plus grandes.

A l'inverse des erreurs de l'effecteur oculaire, nous avons observé une corrélation entre les erreurs de l'effecteur manuel et les performances visuo-spatiales. Nous suggérons que l'incertitude de la position de la cible proprioceptive (du fait du déficit proprioceptif) pourrait inciter les enfants avec un TDC à utiliser des stratégies de compensation pour tenter de localiser la cible. Il est décrit que les enfants avec un TDC ont tendance à plus se fier aux informations visuelles pour le contrôle de leur mouvement (Biancotto et al., 2011; Deconinck et al., 2006; Zwicker et al., 2010). Nous pouvons supposer que dans le cas de cette tâche, l'utilisation de repères visuels comme stratégie de compensation n'était possible que pour les enfants les plus performants au niveau visuo-spatial ; les enfants ayant des difficultés visuo-spatiales ne parvenaient pas à compenser le déficit proprioceptif par des informations visuelles pour guider le mouvement du bras, induisant une corrélation entre les erreurs de l'effecteur manuel et les performances visuo-spatiales au sein du groupe TDC. Cet élément n'affecterait pas les réponses de l'effecteur oculaire car la configuration du dispositif ne permet pas de prendre des repères visuels sur l'écran tactile pendant que le participant regarde le point de fixation initial ; seules les réponses après les éventuelles saccades de correction seraient alors affectées par les déficits visuo-spatiaux. Dans la condition de réponse manuelle, en revanche, la prise de repères visuels était possible puisque les mouvements des yeux n'étaient pas contraints, les yeux pouvaient donc s'orienter vers la dalle tactile afin de l'explorer avant la réponse de l'effecteur manuel.

Cette corrélation entre erreurs proprioceptives mesurées par l'effecteur manuel et performances visuo-spatiales pourrait également expliquer la possible relation retrouvée entre ces erreurs proprioceptives et les performances de dextérité manuelle (bien que la corrélation ne résistait pas à la correction de *p-value* appliquée). En effet, une corrélation entre les performances visuo-spatiales et les performances de dextérité manuelle a été mise en évidence dans une population d'enfants TDC plus grande (Pisella et al., 2021). Cette double relation des performances visuo-spatiales, avec les erreurs manuelles de localisation proprioceptive et avec les performances de dextérité manuelle, pourrait donc être à l'origine de la corrélation, qui serait donc indirecte, entre ces deux derniers paramètres. Le caractère indirect de la corrélation expliquerait alors l'absence de corrélation entre les erreurs oculaires et les performances de dextérité manuelle. Une explication alternative viendrait, comme déjà évoqué, d'un manque de puissance statistique de la corrélation entre les performances de dextérité manuelle et les erreurs oculaires, du fait d'un faible nombre de participants inclus dans cette analyse.

III.2. Des déficits tactiles moins évidents

La tâche de localisation tactile n'a pas révélé de déficit massif dans les populations TDC incluses dans les différentes études. En effet, chez les enfants, la différence entre les deux groupes a été mise en évidence seulement pour l'erreur horizontale et dans certaines conditions : les enfants avec un TDC ont montré de moins bonnes performances que les enfants au développement typique, pour localiser une stimulation courte au niveau de l'index, et pour localiser une stimulation plus longue au niveau du pouce. Malgré cette interaction entre le groupe, la position de stimulation et la durée d'encodage, un effet principal du groupe était retrouvé, et nous pouvions observer, lors des tests post-hoc liés à l'interaction, des *p-values* proches du seuil de significativité pour les autres conditions de stimulation (index/stimulation longue et pouce/stimulation courte). Ce déficit de localisation était présent quel que soit l'effecteur utilisé. Les enfants avec un TDC semblent donc montrer des difficultés pour localiser la distance de la cible tactile par rapport au tronc, puisque le déficit n'était présent que sur l'erreur horizontale. De plus, dans la condition de stimulation tactile appliquée à l'index, qui semble la plus complexe (*i.e.* révélant la plus grande imprécision chez les adultes neurotypiques), les enfants avec un TDC améliorent leur performance lorsque la stimulation est plus longue. Ainsi, augmenter la quantité d'informations tactiles en termes de durée permet aux enfants avec un TDC de localiser la cible tactile plus précisément. Ceci pourrait suggérer un ralentissement du traitement de l'information tactile, déjà évoqué par O'Brien et al. (2008) qui montraient des

temps de réaction plus longs pour localiser un stimulus tactile chez les enfants avec un TDC alors que les temps de réaction pour localiser un stimulus auditif étaient similaires à ceux des enfants au développement typique. L'étude de Nobusako et al. (2021) est également en faveur d'un ralentissement puisque dans une tâche de '*Temporal Order Judgement*' avec des stimuli visuels et tactiles, les enfants avec un TDC montraient un biais en faveur des stimuli visuels : ce biais pourrait être lié à un traitement plus long de l'information tactile, conduisant ainsi à estimer le stimulus visuel comme étant survenu avant le stimulus tactile.

Concernant notre tâche de localisation tactile, aucun déficit n'a été mis en évidence sur l'axe vertical, l'estimation de la hauteur de la stimulation tactile est donc similaire à celle des enfants au développement typique. Enfin, les performances tactiles des enfants avec un TDC ne semblent pas liées à leurs performances motrices. L'ensemble de ces résultats suggère que les altérations tactiles, moins généralisées que les déficits proprioceptifs, ne jouent pas un rôle majeur dans les difficultés motrices des enfants avec un TDC.

Chez l'adulte présentant un TDC, aucun déficit de localisation tactile n'a été révélé pour l'effecteur manuel (les erreurs de l'effecteur oculaire sont en cours de traitement et n'ont pas été incluses dans l'analyse). Les effets de durée de stimulation (qui seront à confirmer avec un effectif complet) sont similaires dans les deux populations (TDC et typique), le ralentissement du traitement de l'information tactile ne semble donc plus apparaître chez l'adulte avec un TDC.

Les seuils de détection et de discrimination tactiles étaient également similaires dans les populations TDC et les populations typiques, que ce soit chez les enfants ou les adultes, en accord avec la littérature (Cox et al., 2015; Law et al., 2011).

Les déficits tactiles dans le TDC semblent donc concerner seulement les aspects relativement complexes de la perception tactile, puisque la détection semble préservée chez l'enfant et l'adulte avec un TDC. La localisation spatiale d'un stimulus paraît altérée chez l'enfant avec un TDC, mais pas la discrimination de deux points. Un ralentissement du traitement de l'information tactile est suspecté du fait de l'amélioration de certaines performances lorsque la stimulation tactile est allongée. Ces déficits tactiles n'ont pas montré de relation étroite avec les difficultés motrices éprouvées par ces enfants présentant un TDC, et n'apparaissent plus à l'âge adulte.

III.3. Un déficit proprioceptif non visible dans la tâche tactile

La tâche de localisation tactile, qui n'a pas permis de mettre en évidence de déficit de localisation sur l'axe vertical, implique également les capacités proprioceptives puisqu'elle a pour but en réalité de localiser une cible proprio-tactile. En effet, la cible est une stimulation tactile appliquée sur une surface cutanée non visible par le participant. Dans la configuration de notre tâche tactile, le participant doit donc estimer l'angle de flexion de son coude pour localiser la position de sa main derrière l'écran tactile, en plus de localiser la position de la stimulation tactile sur sa main. Ce processus de localisation d'un stimulus tactile dans l'environnement, appelé '*spatial remapping*' de l'information tactile, nécessite de combiner la localisation du stimulus tactile sur le corps (via le 'schéma superficiel') aux informations proprioceptives et aux connaissances métriques du membre pour aboutir à un codage dans l'environnement (référentiel externe) (Longo et al., 2015; Medina & Coslett, 2010).

Malgré l'implication de la proprioception dans nos deux tâches, les déficits retrouvés chez les individus avec un TDC, et particulièrement dans la dimension verticale (correspondant à l'angle de flexion du coude) concernaient la tâche de localisation proprioceptive, mais pas la tâche de localisation tactile. De plus, comme évoqué précédemment, les erreurs verticales de la tâche proprioceptive et de la tâche tactile sont faites dans des directions opposées, et ce quelle que soit la population (adulte ou enfant, typique ou pathologique) : les réponses surestiment la hauteur de la cible dans la première tâche, elles la sous-estiment dans la deuxième. Nous pouvons proposer plusieurs pistes de réflexion pour expliquer l'absence de déficit de localisation proprio-tactile sur l'axe vertical chez les enfants avec un TDC. La première hypothèse est en lien avec la présence de la dérive proprioceptive dans la tâche tactile, mais pas dans la tâche proprioceptive. Cette dérive a été décrite comme décalant progressivement les erreurs de localisation vers le corps (*i.e.* dérive proximale) (Wann & Ibrahim, 1992) et vers la ligne médiane (Batikh et al., 2024). L'inversion de la direction de l'erreur verticale entre nos deux tâches, présente dans toutes les populations incluses dans nos études y compris les adultes neurotypiques, suggère que cette dérive proprioceptive intervient également vers la posture canonique du bras (*i.e.* l'avant-bras en position horizontale sur la table) dans la tâche de localisation tactile ; l'avant-bras est en effet en position statique durant toute la tâche, favorisant probablement l'apparition d'une dérive liée à la dégradation des informations proprioceptives. Si le mouvement de l'avant-bras, même passif, semble éviter ou limiter cette dérive dans la tâche proprioceptive (puisque nous n'avons pas observé de différence d'erreurs verticales entre

les durées d'encodage de 2 et 4 secondes), les stimulations tactiles ne semblent pas permettre de l'éviter, comme montré par (Goettker et al., 2020). Les enfants avec un TDC montrent dans la tâche proprioceptive des erreurs verticales majorées de surestimation de la cible, c'est-à-dire que leurs réponses sont situées au-dessus de la position réelle de la cible. La présence de la dérive proprioceptive amenant à estimer la position de la cible de plus en plus basse dans la tâche tactile pourrait donc amener les enfants avec un TDC et les enfants au développement typique à montrer des performances similaires de sous-estimation de la hauteur de la cible. Dans ce cas, ceci pourrait suggérer que la dérive proprioceptive est plus importante chez les enfants avec un TDC par rapport aux enfants au développement typique, puisque leurs réponses initialement plus hautes quelques secondes après le placement du bras en position cible deviendraient finalement aussi basses que celles des enfants contrôles après un certain temps en position statique. Il serait intéressant d'investiguer spécifiquement cette dérive proprioceptive dans cette population, afin d'étudier la vitesse de 'dégradation' de l'information statosthésique chez ces enfants avec un TDC.

Une explication alternative à l'absence de déficit proprioceptif dans la tâche tactile chez les enfants avec un TDC serait que ces deux tâches de localisation fassent appel à des composantes proprioceptives différentes. Bien que le mouvement soit passif et réalisé quelques secondes avant la réponse du participant dans la tâche proprioceptive, une composante de mémoire kinesthésique pourrait être impliquée ; en revanche, dans la tâche tactile, le bras étant fixe pendant toute la durée de la tâche, aucune composante de mouvement du bras cible n'est engagée. Il serait intéressant d'évaluer, par une autre tâche, les capacités de mémoire kinesthésique chez les enfants avec un TDC.

Enfin, nous pouvons également supposer que la présence d'informations tactiles permettrait d'améliorer les capacités de localisation d'une cible somatosensorielle chez l'enfant avec un TDC. Goettker et al. (2020) ont montré, chez les adultes neurotypiques, que la précision du pointage (en termes de variabilité) était améliorée lorsque la cible somatosensorielle était bimodale (*e.g.* proprioceptive et tactile) en comparaison d'une cible uniquement proprioceptive. Cependant, dans leur étude, l'erreur moyenne du pointage, tout comme l'erreur moyenne et l'erreur variable de la saccade oculaire, n'étaient pas affectées par la modalité de la cible. Nous pouvons penser que l'effet de la modalité de la cible pourrait être différent dans une population typique et dans une population d'enfants avec un TDC.

IV. Déficit des modèles internes ou déficits perceptifs dans le TDC ?

Comme nous l'avons décrit en introduction de ce manuscrit, de nombreuses études ont mis en évidence des déficits de contrôle moteur, qui ont été attribués à un déficit des modèles internes, hypothèse prédominante dans la littérature concernant les modèles explicatifs du TDC. Les paradigmes utilisés ont investigué différents aspects de ces modèles internes. Par exemple, les tâches de pointage avec saut de cible, évaluant les corrections rapides en ligne, ont mis en évidence des difficultés dans l'utilisation du modèle direct pour corriger la trajectoire du mouvement (Fuelscher et al., 2015; Hyde & Wilson, 2011a, 2011b). Les tâches d'adaptation visuomotrice ont pointé des déficits dans la mise à jour du modèle inverse, par le biais des signaux d'erreurs détectées par le modèle direct (Brookes et al., 2007; Gómez-Moya et al., 2020; Kagerer et al., 2004, 2006). Les tâches de saccades vers deux cibles successives ont montré un déficit dans l'utilisation du modèle direct, pour prédire les conséquences de la première saccade pour programmer la deuxième (Katschmarsky et al., 2001). Les tâches de planification d'action évaluant le confort final, quant à elles, ont mis en exergue un déficit de l'exécution et du contenu du modèle inverse (Adams et al., 2016, 2017), tout comme les tâches évaluant les ajustements posturaux anticipés (Jover et al., 2010). Enfin, les tâches de rotation mentale ont conclu à un déficit du contenu du modèle interne (Barhoun et al., 2019). Au vu de l'ensemble de ces résultats, la littérature a convergé vers un déficit des modèles internes, direct et inverse, symbolisés en rouge sur la **Figure 14**.

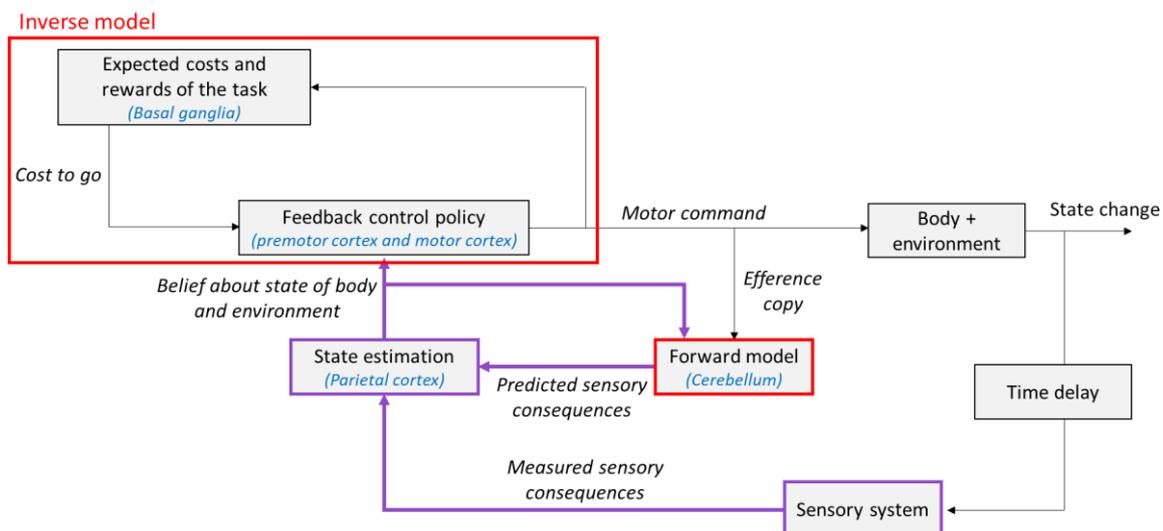


Figure 14. Représentation des déficits potentiels dans le TDC, au niveau des modèles internes (en rouge) et du système perceptif et leurs conséquences (en violet), sur une illustration du Contrôle Optimal en Feedback ('Optimal feedback control'), adaptée de Shadmehr et Krakauer (2008).

L'introduction de ce manuscrit a également permis de rappeler l'importance du système perceptif dans le contrôle moteur. Comme illustré sur la **Figure 14** (en violet), le système sensoriel est particulièrement utile dans cette conception du contrôle moteur centrée sur les modèles internes : il procure des informations nécessaires à l'estimation de l'état du corps et de l'environnement avant un mouvement ; il fournit également les informations sensorielles qui vont être comparées aux prédictions sensorielles pour corriger le mouvement en cours. Le signal d'erreur possiblement généré à la suite de cette comparaison va permettre de mettre à jour le modèle direct et le modèle inverse, ce qui correspond à l'adaptation motrice. Les prédictions sensorielles, procurées par le modèle direct, sont construites grâce aux retours sensoriels réels des essais précédents. Il apparaît donc qu'une imprécision des afférences alimentant les modèles internes pourrait donc, théoriquement, expliquer les déficits des modèles internes précédemment décrits.

Au vu de nos résultats et de la littérature, il semble que les individus avec un TDC présentent des déficits perceptifs : des déficits proprioceptifs ont été mis en évidence par nos résultats chez les enfants présentant un TDC, avec une amélioration à l'âge adulte mais qui ne semble pas suffire à retrouver des performances parfaitement similaires à celles des adultes contrôles. A ce déficit proprioceptif, des difficultés visuo-spaciales peuvent s'ajouter chez près de la moitié des enfants avec un TDC. La présence des déficits proprioceptifs semble expliquer au moins une partie des difficultés de motricité globale (de type équilibre ou encore impliquant les membres supérieurs de manière globale), tandis que les déficits visuospatiaux semblent être en lien avec

les activités de dextérité manuelle (Pisella et al., 2021), généralement réalisées sous contrôle visuel. La cooccurrence non systématique de ces deux déficits perceptifs pourrait ainsi expliquer l'hétérogénéité des difficultés motrices des individus avec un TDC. Puisque la plupart d'entre eux sont touchés par des difficultés d'équilibre (Lust et al., 2022), cela suggère un déficit proprioceptif fréquent dans ce trouble. Ces déficits proprioceptifs pourraient expliquer, au moins partiellement, les déficits de contrôle moteur mis en évidence dans la plupart des études concluant à un déficit des modèles internes. En effet, des études chez des patients désafférentés ont rapporté des déficits de contrôle moteur dans des tâches similaires, indiquant un rôle de l'absence de proprioception dans ces déficits : par exemple, les trajectoires du bras de patients désafférentés dans des tâches de pointage avec saut de cible sont différentes de celles des adultes neurotypiques (Sarlegna et al., 2006) ; l'adaptation prismatique est également parfois perturbée chez les patients désafférentés (Bard et al., 1995). De plus, les déficits des individus avec TDC dans des tâches de rotation mentale pourraient être attribués à une perturbation du schéma corporel (Schwoebel & Coslett, 2005), représentation corporelle pour l'action qui se nourrit spécifiquement des informations proprioceptives et tactiles (Cardinali, Brozzoli, et al., 2009; Cardinali et al., 2016; Martel, Cardinali, et al., 2019). En revanche, concernant l'adaptation visuomotrice, la proprioception ne semble pas jouer un rôle essentiel chez les adultes neurotypiques (Pipereit et al., 2006) ; les déficits visuospatiaux des enfants avec un TDC pourraient alors expliquer les perturbations retrouvées dans de tels paradigmes. Enfin, la moindre précision de la deuxième saccade observée chez les enfants avec un TDC dans une tâche de 'double step' (Katschmarsky et al., 2001) pourrait également être causée par un déficit de mémoire visuo-spatiale déjà mis en évidence dans cette population (Lachambre et al., 2021; Wilson et al., 2013). Nous suggérons donc que les déficits perceptifs peuvent expliquer, au moins partiellement, les altérations de contrôle moteur décrites classiquement dans la littérature comme des déficits de modèles internes.

Nous avons observé un déficit proprioceptif moins marqué chez les adultes avec un TDC (rappelons qu'il ne s'agit que de résultats préliminaires). Pourtant, les difficultés motrices et leurs conséquences sur les AVQ sont toujours présentes pour ces individus, comme mis en évidence par les scores au MABC-2, les performances de pegboard, les capacités d'imitation de postures et le questionnaire ADC. Ceci suggère donc qu'un retour des performances proprioceptives proches de la norme à l'âge adulte ne suffit pas à retrouver des habiletés motrices correctes. Plusieurs hypothèses explicatives peuvent être suggérées. Premièrement, les

déficits proprioceptifs n'expliquent probablement pas toutes les perturbations de contrôle moteur observées. Par exemple, il se peut que le déficit d'adaptation visuomotrice observé chez les individus avec un TDC ne soit pas en lien avec l'imprécision de ces afférences. En effet, la perturbation des informations proprioceptives chez des adultes neurotypiques n'induisait pas de déficit d'adaptation visuomotrice, mais seulement un déficit d'adaptation à un champ de force (Pipereit et al., 2006). Les déficits observés dans les tâches d'adaptation visuomotrice pourraient alors être dus aux déficits visuospatiaux, comme évoqué précédemment. Rappelons également que des déficits des fonctions exécutives ont été rapportés dans le TDC ; même s'ils ne semblent pas expliquer une grande part des difficultés motrices chez l'enfant, ils suggèrent des déficits diffus dans le TDC, affectant différentes fonctions. En deuxième lieu, nous pouvons penser qu'un déficit proprioceptif tout au long de l'enfance, auquel peut s'ajouter un déficit visuospatial, ne permet pas de construire des modèles internes efficaces au cours du développement. Chez le sujet neurotypique, l'utilisation du contrôle moteur prédictif est possible vers l'âge de 8 ans (Martel, Fournier, et al., 2019; Wilson & Hyde, 2013), mais n'étant pas encore optimal à cet âge, il continue de s'affiner jusqu'à l'âge adulte grâce à l'accumulation d'expériences sensorimotrices. Une imprécision des modèles internes liée à un déficit proprioceptif dans l'enfance ne peut probablement pas être entièrement compensée à l'âge adulte, même si les performances proprioceptives reviennent, elles, à un niveau correct. De plus, l'imprécision proprioceptive pourrait également induire un déficit des représentations corporelles, puisque celles-ci se construisent grâce à ces afférences perceptives somatosensorielles (Cardinali, Brozzoli, et al., 2009; Cardinali et al., 2016; Martel, Cardinali, et al., 2019). Ajoutons à cela le manque de pratique d'activités motrices et notamment d'activités physiques, liées à l'évitement de celles-ci face aux difficultés ressenties dans l'enfance et l'adolescence, diminuant encore la quantité d'expériences motrices et donc les opportunités d'apprentissage.

V. Un déficit des représentations corporelles dans le TDC ?

Comme évoqué dans le chapitre II de cette discussion générale, les erreurs horizontales se font en moyenne dans la direction proximale, en direction du coude, c'est-à-dire que la distance de la cible dans le plan sagittal est sous-estimée. L'index est donc perçu plus proche du tronc qu'il ne l'est réellement, et ce quel que soit le type de tâche (proprioceptive ou tactile), l'effecteur (manuel ou oculaire) et la population (enfant ou adulte, TDC ou typique). Bien que nos tâches n'étaient pas faites pour tester cette question (ce qui aurait nécessité d'utiliser au moins deux stimulations le long de l'axe horizontal et de comparer l'écart de pointage à la distance réelle entre ces 2 points), cette erreur pourrait refléter la sous-estimation de la longueur de l'avant-bras ou de la main, typique des distorsions des représentations corporelles (Longo, 2022; Longo & Haggard, 2010; Matsumiya, 2022).

Chez l'enfant avec un TDC, nous avons observé une plus grande imprécision de la localisation de la cible somatosensorielle, par rapport aux enfants au développement typique, sur l'axe horizontal. Cette plus grande sous-estimation était particulièrement présente dans la tâche proprioceptive, dans laquelle il fallait localiser l'index dans différentes positions angulaires du coude ; dans la tâche tactile, elle n'apparaissait que dans certaines conditions de position et de durée de stimulation tactile, mais nous avons pu observer des tendances dans toutes les conditions. Ce résultat pourrait indiquer que la distorsion de la représentation de la longueur du bras est plus marquée chez les enfants avec un TDC par rapport aux enfants au développement typique. Gauduel et collaborateurs (2024) ont également suggéré une altération des représentations corporelles chez les enfants avec un TDC, mise en évidence par une tâche d'identification des doigts basée sur les informations tactiles. Martel et al. (2022) ont également mis en évidence que la plasticité à court terme des représentations corporelles des enfants avec un TDC étaient altérées. En effet, ces auteurs ont analysé les paramètres cinématiques lors d'une tâche de saisie d'un objet, avant et après avoir utilisé un outil. Cette utilisation d'outil est connue pour induire des modifications cinématiques post-utilisation, interprétées comme le reflet de l'incorporation de l'outil dans les représentations corporelles pour l'action. Ces changements cinématiques témoignent donc d'une plasticité des représentations corporelles, observée chez l'adulte neurotypique (Cardinali et al., 2012; Cardinali et al., 2009; Martel et al., 2019), mais également chez l'enfant au développement typique (avant l'adolescence), bien que cette plasticité soit immature et donc différente de celle des adultes (Martel et al., 2021). Chez l'enfant présentant un TDC, le pattern de modifications cinématiques après l'utilisation d'un

outil est différent de celui des enfants au développement typique (Martel et al., 2022). L'altération de la plasticité à court terme des représentations corporelles a donc déjà été supposée chez les enfants avec un TDC. Nos résultats pourraient suggérer que chez l'enfant avec un TDC, il existe un défaut de plasticité à plus long terme des représentations corporelles, plasticité qui est nécessaire pour s'adapter aux changements morphologiques liés à la croissance. Les distorsions de représentation de la longueur de l'avant-bras, possiblement reflétées par les erreurs horizontales, pourraient alors être plus importantes chez les enfants avec un TDC, en comparaison des enfants typiques, en lien avec ce défaut de plasticité à 'long terme' des représentations corporelles.

Les résultats préliminaires de notre troisième étude indiquent que les adultes avec un TDC font des erreurs horizontales similaires à celles des adultes neurotypiques, que ce soit dans la tâche de localisation proprioceptive ou tactile. Les représentations corporelles du bras ne semblent donc pas affectées chez les adultes avec un TDC, mais est-ce lié à des capacités plastiques préservées ou bien simplement à la stabilité des caractéristiques métriques du membre ? En effet, la période de forte croissance étant terminée, les dimensions de l'avant-bras sont stables chez l'adulte. L'adaptation liée au changement de taille du membre n'est donc plus nécessaire, et la représentation corporelle pourrait alors se rétablir au fil du temps, malgré une possible altération de ses capacités plastiques à court terme. De plus, les afférences proprioceptives sont nécessaires pour garantir cette plasticité (Cardinali et al., 2016). Il nous paraît particulièrement intéressant d'étudier les capacités de plasticité à court terme des représentations corporelles chez les adultes avec un TDC, par le biais du paradigme d'utilisation d'outil, d'autant plus si le déficit proprioceptif se confirme dans cette population. Si la représentation de la longueur de l'avant-bras ne semble pas altérée, ses capacités plastiques sont-elles similaires à celles des adultes neurotypiques ? Dans le cadre de ce travail de thèse, nous avons débuté le recueil de ces données, comme évoqué dans la méthodologie de l'étude 3. L'analyse de ces données donnera des informations importantes pour la compréhension des mécanismes sous-jacents du TDC chez l'adulte.

VI. Des données expérimentales à la pratique clinique

Nous avons mis en évidence la présence de déficits proprioceptifs chez les enfants avec un TDC. Dans le cadre expérimental, la tâche proposée consistait à localiser une cible proprioceptive par le biais de pointage manuel et de saccade oculaire ; l'effecteur oculaire avait pour but d'éviter un possible facteur confondant lié à l'imprécision motrice du membre supérieur, définissant le TDC. En parallèle de cette tâche, nous avons également utilisé des tâches de repositionnement actif, classiquement utilisées dans le domaine clinique notamment chez des patients après une blessure musculosquelettique (entorse de cheville ou lésion du ligament croisé du genou par exemple) pour évaluer l'efficacité d'un protocole de rééducation. Dans les deux études conduites chez les individus avec un TDC, nous avons pu observer que les déficits mis en évidence dans les tâches de repositionnement apparaissaient lorsque des déficits étaient également visibles au niveau des réponses manuelles de notre tâche expérimentale de localisation proprioceptive. En effet, chez les enfants avec un TDC, nous avons observé une différence significative dans cette dernière tâche quel que soit l'effecteur utilisé, et nous avons également retrouvé une différence dans les tâches de repositionnement. A l'inverse, chez l'adulte avec un TDC, nous avons observé une performance similaire dans les deux groupes, que ce soit dans les tâches de repositionnement actif ou dans la tâche de localisation proprioceptive avec l'effecteur manuel. Au vu de ces résultats, nous pouvons suggérer que ces deux tâches révèlent le même type de déficit. Les tâches de repositionnement actif, plus facilement utilisables en pratique clinique, pourraient alors être utilisées pour mettre en évidence un déficit proprioceptif chez les patients avec un TDC.

Chez les adultes avec un TDC, nous avons observé des déficits d'erreurs de localisation avec l'effecteur oculaire mais pas avec l'effecteur manuel. L'une des hypothèses explicatives de ce résultat pourrait être que le déficit proprioceptif est relativement discret chez les adultes, ne permettant pas d'être révélé par la réponse manuelle, insuffisamment sensible. Si cette hypothèse se confirme (après analyse de la population complète dans cette tâche et dans la tâche de localisation tactile), et que nous confirmons que le déficit de repositionnement n'apparaît toujours pas dans des populations où il n'y a pas non plus de déficit de réponse manuelle de localisation proprioceptive, nous pourrions suggérer que les tâches de repositionnement permettent de révéler une imprécision proprioceptive lorsque le déficit est relativement sévère, et donc lorsqu'il y a une importance majeure à tenir compte de ces déficits dans la prise en charge du patient.

Il serait intéressant d'investiguer plus précisément les performances d'individus neurotypiques dans ce type de tâche, dans le but d'établir un seuil évoquant un déficit proprioceptif pathologique : la limite inférieure du premier intervalle interquartile pourrait être utilisé comme seuil indiquant une faiblesse proprioceptive, comme cela a été fait par exemple pour le test visuo-spatial PVSE (Pisella et al., 2020). Ceci nécessiterait donc une étude incluant une population de grande ampleur. Le développement d'un outil permettant de mettre en évidence un déficit proprioceptif paraît très utile, pour permettre de l'identifier dans le domaine clinique et proposer ainsi une prise en charge centrée sur les déficits de chaque individu avec TDC.

Au vu des résultats mis en évidence dans nos travaux, il semble utile de tenir compte des déficits perceptifs dans la rééducation des patients présentant un TDC. En effet, il semble que chez les enfants avec un TDC, le déficit proprioceptif et les difficultés motrices soient liés, notamment pour les performances d'équilibre et d'activités de balle. Les approches orientées vers les activités ayant montré plus d'efficacité que les approches orientées vers les déficits sous-jacents pour améliorer la performance motrice des enfants avec un TDC (Smits-Engelsman et al., 2013), un entraînement proprioceptif par le biais de tâches de repositionnement ne paraît pas le plus judicieux. Cependant, proposer des activités motrices permettant de cibler certains déficits perceptifs somatosensoriels pourrait permettre d'optimiser l'efficacité de l'intervention. Par exemple, pour améliorer les performances d'équilibre, le choix du type de surface sur laquelle se fait l'entraînement pourrait avoir une importance : il a en effet été montré que le type de surface instable utilisée (mousse *versus* un plan instable dans une direction spécifique dans cette étude) avait des conséquences sur le recrutement ou non des afférences proprioceptives de la cheville pour maintenir son équilibre (Forestier et al., 2015).

Ainsi, mieux comprendre les déficits spécifiques du TDC pourrait permettre d'améliorer la prise en charge, même si celle-ci reste centrée sur les activités (dans cet exemple, l'équilibre) et non sur les déficits sous-jacents.

D'un point de vue plus général, il est important de rappeler qu'une évaluation aussi objective que possible est nécessaire en pratique clinique, et ce, particulièrement pour poser un diagnostic de TDC. Les recommandations de l'EACD (Blank et al., 2019) ainsi que le rapport d'expertise collective de l'INSERM sur le TDC (2019) indiquent d'utiliser un test standardisé pour évaluer les performances motrices des enfants dans le cadre d'un diagnostic de TDC. Nous avons pourtant constaté au cours de nos études expérimentales que de nombreux enfants avaient reçu un diagnostic de TDC sans aucune évaluation standardisée de leurs compétences motrices. Il

s'est avéré, lors de la passation du MABC-2 dans le cadre du recrutement dans nos études, que certains ont finalement obtenu un score au MABC-2 correspondant à des performances tout à fait correctes, voire bonnes pour leur âge. En effet, 6 enfants ayant reçu un diagnostic de TDC (sur les 25 qui ont participé à l'étude au total) ont été exclus de l'étude du fait d'un score au MABC-2 dans la norme. Nous n'avions pourtant pas imposé un critère drastique puisque notre score d'inclusion était fixé au 16^{ème} percentile (et non au 5^{ème} percentile puisque nous avons exclus les enfants nés prématurés qui semblent être les plus sévèrement atteints par les difficultés motrices (Gras et al. 2023)). Certains de ces enfants ont d'ailleurs obtenu des scores les situant au 50^{ème} percentile pour deux d'entre eux, voire au 91^{ème} percentile pour un enfant. Outre la pose d'un diagnostic potentiellement inexact, cela ne permet pas une prise en charge clinique optimale pour ces patients. Si le diagnostic de TDC n'est finalement pas justifié du fait de performances motrices dans la norme, les difficultés ressenties dans le quotidien, qui sont quant à elles bien présentes, peuvent alors avoir une autre cause ; passer à côté du diagnostic d'un autre trouble (neurodéveloppemental par exemple) peut conduire à une prise en charge insuffisamment spécifique et donc moins efficace.

Ces difficultés dans la pose du diagnostic de TDC viennent pointer le décalage parfois présent entre les recommandations émanant du domaine de la recherche et la pratique clinique. Il nous semble donc important de rappeler la nécessité de dialogue entre la recherche et la pratique clinique, afin de transmettre toutes les connaissances et hypothèses apportées par la recherche pour toujours améliorer la prise en charge clinique, et ainsi le quotidien des patients. L'inclusion des cliniciens et des patients dans la recherche est également primordiale, afin notamment de centrer les recherches sur les attentes et questionnements les plus pertinents pour les patients.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

En conclusion, cette thèse a permis de mettre en évidence des déficits perceptifs somatosensoriels dans le TDC : les enfants avec un TDC semblent présenter des déficits proprioceptifs, qui sont en lien avec la sévérité de leurs difficultés motrices, notamment dans le domaine de l'équilibre et des compétences de balle. Les difficultés de perception tactile spatiale semblent également présentes, même si elles apparaissent moins évidentes. Ces déficits somatosensoriels semblent s'atténuer à l'âge adulte, malgré la persistance des difficultés motrices. Ainsi, ces résultats questionnent une éventuelle altération des représentations corporelles, qui pourrait être liée aux déficits somatosensoriels présents durant l'enfance chez l'individu avec un TDC. L'investigation de la plasticité des représentations corporelles chez l'adulte avec un TDC semble particulièrement intéressante dans ce contexte et permettrait de mieux comprendre les mécanismes pouvant causer les difficultés motrices dans le TDC. Nous avons déjà débuté une telle étude dans cette population, utilisant un paradigme d'utilisation d'outil évoqué précédemment.

Il serait intéressant d'évaluer les capacités proprioceptives des enfants avec un TDC dans des populations de plus grande taille, dans le but de déterminer la prévalence de ce déficit dans le TDC. En effet, les déficits visuo-spatiaux ne semblent être présents que dans une proportion d'individus avec un TDC, mais qu'en est-il du déficit proprioceptif ? Si seulement une part des enfants avec un TDC présente ce déficit somatosensoriel, il serait intéressant de développer un outil d'évaluation de l'acuité proprioceptive, utilisable dans le domaine clinique et proposant des données normatives, dans le but de pouvoir identifier la présence d'un déficit proprioceptif de manière individualisée.

Concernant le lien entre les déficits proprioceptifs et les difficultés motrices du TDC, nous avons pu mettre en évidence une corrélation au sein de la population TDC. Ainsi, nous pouvons suggérer que plus le déficit proprioceptif est important, plus les performances motrices sont faibles chez les enfants avec un TDC. Cependant, cela ne permet pas nécessairement de conclure à un lien causal du déficit proprioceptif dans les difficultés motrices. Une analyse de corrélation dans la population globale, incluant des enfants au développement typique et des enfants avec un TDC, pourrait apporter des informations sur le lien entre ces deux capacités. Il ne semblait pas pertinent de réaliser une telle analyse dans nos études, puisque la taille des populations pourrait conduire à une corrélation significative dirigée uniquement par l'effet du

groupe. Une telle analyse nécessiterait une population de taille bien plus importante, pour évaluer s'il existe un continuum entre les enfants au développement typique et les enfants avec un TDC.

Enfin, il apparaît nécessaire de redéfinir le lien entre les performances proprioceptives et les déficits de contrôle moteur jusque-là attribués à un déficit de modèles internes. Pour cela, il pourrait être pertinent d'investiguer, au sein d'une même population d'enfants avec un TDC, les capacités proprioceptives du membre supérieur d'une part, et d'autre part une tâche faisant appel au contrôle moteur prédictif, telle qu'une tâche de pointage avec saut de cible ou une tâche de pointage avec perturbation mécanique (*e.g.* avec un champ de force). Adams et al. (2016) avaient déjà tenté d'investiguer ce lien en proposant une tâche de repositionnement actif du coude et une tâche évaluant la planification motrice. Les auteurs n'avaient pas rapporté de lien entre ces deux performances, mais la tâche proprioceptive utilisait un outil de mesure peu précis, ne permettant probablement pas de mettre en évidence un déficit proprioceptif. Il serait donc pertinent d'investiguer ce lien en utilisant une tâche proprioceptive telle que celle que nous avons développé.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abedi Khoozani, P., & Blohm, G. (2018). Neck muscle spindle noise biases reaches in a multisensory integration task. *Journal of Neurophysiology*, *120*(3), 893-909. <https://doi.org/10.1152/jn.00643.2017>
- Abedi Khoozani, P., Voudouris, D., Blohm, G., & Fiehler, K. (2020). Reaching around obstacles accounts for uncertainty in coordinate transformations. *Journal of Neurophysiology*, *123*(5), 1920-1932. <https://doi.org/10.1152/jn.00049.2020>
- Adamo, D. E., Martin, B. J., & Brown, S. H. (2007). Age-related differences in upper limb proprioceptive acuity. *Perceptual and Motor Skills*, *104*, 1297-1309. <https://doi.org/10.2466/PMS.104.4.1297-1309>
- Adams, I. L. J., Ferguson, G. D., Lust, J. M., Steenbergen, B., & Smits-Engelsman, B. C. M. (2016). Action planning and position sense in children with Developmental Coordination Disorder. *Human Movement Science*, *46*, 196-208. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2016.01.006>
- Adams, I. L. J., Lust, J. M., Wilson, P. H., & Steenbergen, B. (2014). Compromised motor control in children with DCD : A deficit in the internal model?—A systematic review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *47*, 225-244. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2014.08.011>
- Adams, I. L. J., Lust, J. M., Wilson, P. H., & Steenbergen, B. (2017). Testing predictive control of movement in children with developmental coordination disorder using converging operations. *British Journal of Psychology*, *108*(1), 73-90. <https://doi.org/10.1111/bjop.12183>
- Alloway, T. P., & Temple, K. J. (2007). A comparison of working memory skills and learning in children with developmental coordination disorder and moderate learning difficulties. *Applied Cognitive Psychology*, *21*(4), 473-487. <https://doi.org/10.1002/acp.1284>
- American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders (DSM-5®)* (5th edition). American Psychiatric Publishing.
- American Psychiatric Association. (2015). *DSM-5—Manuel Diagnostique et Statistique des Troubles Mentaux* (Elsevier Masson).
- Amlôt, R., & Walker, R. (2006). Are somatosensory saccades voluntary or reflexive? *Experimental Brain Research*, *168*(4), 557-565. <https://doi.org/10.1007/s00221-005-0116-9>

Amlôt, R., Walker, R., Driver, J., & Spence, C. (2003). Multimodal visual–somatosensory integration in saccade generation. *Neuropsychologia*, *41*(1), 1-15.

[https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(02\)00139-2](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(02)00139-2)

Amoruso, E., Terhune, D. B., Kromm, M., Kirker, S., Muret, D., & Makin, T. R. (2023). Reassessing referral of touch following peripheral deafferentation : The role of contextual bias. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, *167*, 167-177. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2023.04.019>

Andersen, R. A., & Cui, H. (2009). Intention, action planning, and decision making in parietal-frontal circuits. *Neuron*, *63*(5), 568-583. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2009.08.028>

Arthur, T., Harris, D. J., Allen, K., Naylor, C. E., Wood, G., Vine, S., Wilson, M. R., Tsaneva-Atanasova, K., & Buckingham, G. (2021). Visuo-motor attention during object interaction in children with developmental coordination disorder. *Cortex*, *138*, 318-328. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2021.02.013>

Asghari, M., Elali, K., Sullivan, A., LaFleur, B., Madigan, M. L., & Toosizadeh, N. (2024). Assessing the role of ankle and hip joint proprioceptive information in balance recovery using vibratory stimulation. *Heliyon*, *10*(4), e25979. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25979>

Assaiante, C., Barlaam, F., Cignetti, F., & Vaugoyeau, M. (2014). Body schema building during childhood and adolescence : A neurosensory approach. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, *44*(1), 3-12. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2013.10.125>

Augurelle, A.-S., Smith, A. M., Lejeune, T., & Thonnard, J.-L. (2003). Importance of cutaneous feedback in maintaining a secure grip during manipulation of hand-held objects. *Journal of Neurophysiology*, *89*(2), 665-671. <https://doi.org/10.1152/jn.00249.2002>

Auld, M. L., Boyd, R. N., Moseley, G. L., & Johnston, L. M. (2011). Tactile Assessment in Children with Cerebral Palsy : A Clinimetric Review. *Physical & Occupational Therapy In Pediatrics*, *31*, 413-439. <https://doi.org/10.3109/01942638.2011.572150>

Bahmad, S., Miller, L. E., Pham, M. T., Moreau, R., Salemme, R., Koun, E., Farnè, A., & Roy, A. C. (2020). Online proprioception feeds plasticity of arm representation following tool-use in healthy aging. *Scientific Reports*, *10*(1), 17275. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74455-5>

- Bard, C., Fleury, M., Teasdale, N., Paillard, J., & Nougier, V. (1995). Contribution of proprioception for calibrating and updating the motor space. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 73(2), 246-254. <https://doi.org/10.1139/y95-035>
- Barhoun, P., Fuelscher, I., Kothe, E. J., He, J. L., Youssef, G. J., Enticott, P. G., Williams, J., & Hyde, C. (2019). Motor imagery in children with DCD : A systematic and meta-analytic review of hand-rotation task performance. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 99, 282-297. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2019.02.002>
- Barnhart, R. C., Davenport, M. J., Epps, S. B., & Nordquist, V. M. (2003). Developmental coordination disorder. *Physical Therapy*, 83(8), 722-731.
- Bassolino, M., & Becchio, C. (2023). The 'hand paradox' : Distorted representations guide optimal actions. *Trends in Cognitive Sciences*, 27(1), 7-8. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2022.09.010>
- Bastian, H. C. (1887). The « Muscular sense » : Its nature and cortical localisation. *Brain*, 10(1), 1-89. <https://doi.org/10.1093/brain/10.1.1>
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting Linear Mixed-Effects Models Using **lme4**. *Journal of Statistical Software*, 67(1). <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Batikh, A., Gaveau, V., Panouillères, M. T. N., Koun, É., Salemme, R., Farnè, A., & Péliisson, D. (2024). Saccades to both vision and touch are modified following adaptation but cross-modal transfers are asymmetrical. *Journal of Neurophysiology*, 132(4), 1183-1197. <https://doi.org/10.1152/jn.00154.2024>
- Becker, W. (1989). The neurobiology of saccadic eye movements. Metrics. *Reviews of Oculomotor Research*, 3, 13-67.
- Begum Ali, J., Cowie, D., & Bremner, A. J. (2014). Effects of posture on tactile localization by 4 years of age are modulated by sight of the hands : Evidence for an early acquired external spatial frame of reference for touch. *Developmental Science*, 17(6), 935-943. <https://doi.org/10.1111/desc.12184>
- Bernier, P.-M., Chua, R., Bard, C., & Franks, I. M. (2006). Updating of an internal model without proprioception : A deafferentation study. *Neuroreport*, 17(13), 1421-1425. <https://doi.org/10.1097/01.wnr.0000233096.13032.34>
- Biancotto, M., Skabar, A., Bulgheroni, M., Carrozzi, M., & Zoia, S. (2011). Neuromotor deficits in developmental coordination disorder : Evidence from a reach-to-grasp task.

Research in Developmental Disabilities, 32(4), 1293-1300.

<https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.02.007>

Biotteau, M., Chaix, Y., & Albaret, J.-M. (2016). What Do We Really Know About Motor Learning in Children with Developmental Coordination Disorder? *Current Developmental Disorders Reports*, 3(2), 152-160. <https://doi.org/10.1007/s40474-016-0084-8>

Blais, M., Baly, C., Biotteau, M., Albaret, J.-M., Chaix, Y., & Tallet, J. (2017). Lack of Motor Inhibition as a Marker of Learning Difficulties of Bimanual Coordination in Teenagers With Developmental Coordination Disorder. *Developmental Neuropsychology*, 42(3), 207-219.

<https://doi.org/10.1080/87565641.2017.1306526>

Blais, M., Jucla, M., Maziero, S., Albaret, J.-M., Chaix, Y., & Tallet, J. (2021). Specific Cues Can Improve Procedural Learning and Retention in Developmental Coordination Disorder and/or Developmental Dyslexia. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15, 744562.

<https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.744562>

Blank, R., Barnett, A. L., Cairney, J., Green, D., Kirby, A., Polatajko, H., Rosenblum, S., Smits-Engelsman, B., Sugden, D., Wilson, P., & Vinçon, S. (2019). International clinical practice recommendations on the definition, diagnosis, assessment, intervention, and psychosocial aspects of developmental coordination disorder. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 61(3), 242-285. <https://doi.org/10.1111/dmcn.14132>

Blanke, O., & Grüsser, O.-J. (2001). Saccades guided by somatosensory stimuli. *Vision Research*, 41(18), 2407-2412. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(01\)00125-0](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(01)00125-0)

Blouin, J., Bard, C., Teasdale, N., Paillard, J., Fleury, M., Forget, R., & Lamarre, Y. (1993). Reference systems for coding spatial information in normal subjects and a deafferented patient. *Experimental Brain Research*, 93(2). <https://doi.org/10.1007/BF00228401>

Bo, J., Langan, J., & Seidler, R. D. (2008). Cognitive Neuroscience of Skill Acquisition. In A. S. Benjamin, J. S. De Belle, B. Etnyre, & T. A. Polk (Éds.), *Advances in Psychology* (Vol. 139, p. 101-112). North-Holland. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)10009-7](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)10009-7)

Bourdin, C., Bringoux, L., Gauthier, G. M., & Vercher, J. L. (2006). Vision of the hand prior to movement onset allows full motor adaptation to a multi-force environment. *Brain Research Bulletin*, 71(1-3), 101-110. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2006.08.007>

Bremner, A. J., Mareschal, D., Lloyd-Fox, S., & Spence, C. (2008). Spatial localization of touch in the first year of life : Early influence of a visual spatial code and the development of

remapping across changes in limb position. *Journal of Experimental Psychology: General*, *137*(1), 149-162. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.137.1.149>

Brookes, R. L., Nicolson, R. I., & Fawcett, A. J. (2007). Prisms throw light on developmental disorders. *Neuropsychologia*, *45*(8), 1921-1930.

<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.11.019>

Bruininks, R. (1978). *Bruininks-Oseretsky Test of Motor Proficiency* (American Guidance Service).

Buneo, C. A., Jarvis, M. R., Batista, A. P., & Andersen, R. A. (2002). Direct visuomotor transformations for reaching. *Nature*, *416*(6881), 632-636. <https://doi.org/10.1038/416632a>

Cantin, N., Polatajko, H. J., Thach, W. T., & Jaglal, S. (2007). Developmental coordination disorder : Exploration of a cerebellar hypothesis. *Human Movement Science*, *26*(3), 491-509.

<https://doi.org/10.1016/j.humov.2007.03.004>

Cardinali, L., Brozzoli, C., & Farnè, A. (2009). Peripersonal Space and Body Schema : Two Labels for the Same Concept? *Brain Topography*, *21*(3-4), 252-260.

<https://doi.org/10.1007/s10548-009-0092-7>

Cardinali, L., Brozzoli, C., Luauté, J., Roy, A. C., & Farnè, A. (2016). Proprioception Is Necessary for Body Schema Plasticity : Evidence from a Deafferented Patient. *Frontiers in Human Neuroscience*, *10*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00272>

Cardinali, L., Frassinetti, F., Brozzoli, C., Urquizar, C., Roy, A. C., & Farnè, A. (2009). Tool-use induces morphological updating of the body schema. *Current Biology*, *19*, 478-479.

<https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.05.009>

Cardinali, L., Jacobs, S., Brozzoli, C., Frassinetti, F., Roy, A. C., & Farnè, A. (2012). Grab an object with a tool and change your body : Tool-use-dependent changes of body representation for action. *Experimental Brain Research*, *218*(2), 259-271. <https://doi.org/10.1007/s00221-012-3028-5>

Carskadon, M. A., & Acebo, C. (1993). A self-administered rating scale for pubertal development. *The Journal of Adolescent Health: Official Publication of the Society for Adolescent Medicine*, *14*(3), 190-195. [https://doi.org/10.1016/1054-139x\(93\)90004-9](https://doi.org/10.1016/1054-139x(93)90004-9)

Caudron, S., Nougier, V., & Guerraz, M. (2010). Postural challenge and adaptation to vibration-induced disturbances. *Experimental Brain Research*, *202*(4), 935-941.

<https://doi.org/10.1007/s00221-010-2194-6>

- Chen, F., Pan, C., Chu, C., Tsai, C., & Tseng, Y. (2020). Joint position sense of lower extremities is impaired and correlated with balance function in children with developmental coordination disorder. *Journal of Rehabilitation Medicine*, *52*(8), jrm00088. <https://doi.org/10.2340/16501977-2720>
- Chen, X., & Qu, X. (2019). Age-Related Differences in the Relationships Between Lower-Limb Joint Proprioception and Postural Balance. *Human Factors*, *61*(5), 702-711. <https://doi.org/10.1177/0018720818795064>
- Cheng, C.-H., Ju, Y.-Y., Chang, H.-W., Chen, C.-L., Pei, Y.-C., Tseng, K. C., & Cheng, H.-Y. K. (2014). Motor impairments screened by the Movement Assessment Battery for Children-2 are related to the visual-perceptual deficits in children with Developmental Coordination Disorder. *Research in Developmental Disabilities*, *35*(9), 2172-2179. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2014.05.009>
- Cho, J.-E., & Kim, H. (2021). Ankle Proprioception Deficit Is the Strongest Factor Predicting Balance Impairment in Patients With Chronic Stroke. *Archives of Rehabilitation Research and Clinical Translation*, *3*(4). <https://doi.org/10.1016/j.arct.2021.100165>
- Cignetti, F., Caudron, S., Vaugoyeau, M., & Assaiante, C. (2013). Body Schema Disturbance in Adolescence : From Proprioceptive Integration to the Perception of Human Movement. *Journal of Motor Learning and Development*, *1*(3), 49-58. <https://doi.org/10.1123/jmld.1.3.49>
- Cignetti, F., Vaugoyeau, M., Fontan, A., Jover, M., Livet, M.-O., Hugonenq, C., Audic, F., Chabrol, B., & Assaiante, C. (2018). Feedforward motor control in developmental dyslexia and developmental coordination disorder : Does comorbidity matter? *Research in Developmental Disabilities*, *76*, 25-34. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2018.03.001>
- Coelho, L. A., & Gonzalez, C. L. R. (2024). Perception, action, and the body model. *Neuropsychologia*, *196*, 108853. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2024.108853>
- Coiner, B., Pan, H., Bennett, M. L., Bodien, Y. G., Iyer, S., O'Neil-Pirozzi, T. M., Leung, L., Giacino, J. T., & Stern, E. (2019). Functional neuroanatomy of the human eye movement network : A review and atlas. *Brain Structure and Function*, *224*(8), 2603-2617. <https://doi.org/10.1007/s00429-019-01932-7>
- Coleman, R., Piek, J. P., & Livesey, D. J. (2001). A longitudinal study of motor ability and kinaesthetic acuity in young children at risk of developmental coordination disorder. *Human Movement Science*, *20*(1-2), 95-110. [https://doi.org/10.1016/S0167-9457\(01\)00030-6](https://doi.org/10.1016/S0167-9457(01)00030-6)

- Conners, C. K., Erhardt, D., & Sparrow, E. P. (1999). *Conners' adult ADHD rating scales (CAARS)*. Multi-Health Systems Inc. (MHS).
- Cousins, M., & Smyth, M. M. (2003). Developmental coordination impairments in adulthood. *Human Movement Science*, 22(4-5), 433-459. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2003.09.003>
- Cox, L. E., Harris, E. C., Auld, M. L., & Johnston, L. M. (2015). Impact of tactile function on upper limb motor function in children with Developmental Coordination Disorder. *Research in Developmental Disabilities*, 45-46, 373-383. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2015.07.034>
- Crawford, J. D., Henriques, D. Y. P., & Medendorp, W. P. (2011). Three-Dimensional Transformations for Goal-Directed Action. *Annual Review of Neuroscience*, 34(Volume 34, 2011), 309-331. <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-061010-113749>
- Culham, J. C., Cavina-Pratesi, C., & Singhal, A. (2006). The role of parietal cortex in visuomotor control : What have we learned from neuroimaging? *Neuropsychologia*, 44(13), 2668-2684. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2005.11.003>
- Cunningham, H. A. (1989). Aiming error under transformed spatial mappings suggests a structure for visual-motor maps. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 15(3), 493-506. <https://doi.org/10.1037//0096-1523.15.3.493>
- De Brouwer, A. J., Flanagan, J. R., & Spering, M. (2021). Functional Use of Eye Movements for an Acting System. *Trends in Cognitive Sciences*, 25(3), 252-263. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2020.12.006>
- De Renzi, E., Motti, F., & Nichelli, P. (1980). Imitating gestures. A quantitative approach to ideomotor apraxia. *Archives of Neurology*, 37(1), 6-10. <https://doi.org/10.1001/archneur.1980.00500500036003>
- de Vignemont, F. (2010). Body schema and body image—Pros and cons. *Neuropsychologia*, 48(3), 669-680. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.09.022>
- Deconinck, F. J. A., De Clercq, D., Savelsbergh, G. J. P., Van Coster, R., Oostra, A., Dewitte, G., & Lenoir, M. (2006). Visual contribution to walking in children with Developmental Coordination Disorder. *Child: Care, Health and Development*, 32(6), 711-722. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2214.2006.00685.x>
- Deshpande, N., Simonsick, E., Metter, E. J., Ko, S., Ferrucci, L., & Studenski, S. (2016). Ankle proprioceptive acuity is associated with objective as well as self-report measures of

- balance, mobility, and physical function. *Age (Dordrecht, Netherlands)*, 38(3), 53.
<https://doi.org/10.1007/s11357-016-9918-x>
- Dewey, D., Creighton, D. E., Heath, J. A., Wilson, B. N., Anseeuw-Deeks, D., Crawford, S. G., & Sauve, R. (2011). Assessment of Developmental Coordination Disorder in Children Born With Extremely Low Birth Weights. *Developmental Neuropsychology*, 36(1), 42-56.
<https://doi.org/10.1080/87565641.2011.540535>
- Dijkerman, H. C., & de Haan, E. H. F. (2007). Somatosensory processes subserving perception and action. *The Behavioral and Brain Sciences*, 30(2), 189-201; discussion 201-239. <https://doi.org/10.1017/S0140525X07001392>
- Dionne, E., Bolduc, M.-È., Majnemer, A., Beauchamp, M. H., & Brossard-Racine, M. (2023). Academic Challenges in Developmental Coordination Disorder : A Systematic Review and Meta-Analysis. *Physical & Occupational Therapy in Pediatrics*, 43(1), 34-57.
<https://doi.org/10.1080/01942638.2022.2073801>
- Doyle, A. J. R., Elliott, J. M., & Connolly, K. J. (1986). Measurement of Kinaesthetic Sensitivity. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 28(2), 188-193.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.1986.tb03853.x>
- Doyon, J., & Benali, H. (2005). Reorganization and plasticity in the adult brain during learning of motor skills. *Current Opinion in Neurobiology*, 15(2), 161-167.
<https://doi.org/10.1016/j.conb.2005.03.004>
- Draghi, T. T. G., Cavalcante Neto, J. L., Rohr, L. A., Jelsma, L. D., & Tudella, E. (2020). Symptoms of anxiety and depression in children with developmental coordination disorder : A systematic review. *Jornal De Pediatria*, 96(1), 8-19.
<https://doi.org/10.1016/j.jped.2019.03.002>
- Edin, B. B. (2001). Cutaneous afferents provide information about knee joint movements in humans. *The Journal of Physiology*, 531(1), 289-297. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.2001.0289j.x>
- Edin, B. B., Westling, G., & Johansson, R. S. (1992). Independent control of human finger-tip forces at individual digits during precision lifting. *The Journal of Physiology*, 450, 547-564.
<https://doi.org/10.1113/jphysiol.1992.sp019142>
- Edwards, J., Berube, M., Erlandson, K., Haug, S., Johnstone, H., Meagher, M., Sarkodee-Adoo, S., & Zwicker, J. G. (2011). Developmental coordination disorder in school-aged

children born very preterm and/or at very low birth weight : A systematic review. *Journal of Developmental and Behavioral Pediatrics: JDBP*, 32(9), 678-687.

<https://doi.org/10.1097/DBP.0b013e31822a396a>

Elbasan, B., Kayihan, H., & Duzgun, I. (2012). Sensory integration and activities of daily living in children with developmental coordination disorder. *Italian Journal of Pediatrics*, 38(1), 14. <https://doi.org/10.1186/1824-7288-38-14>

Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47(6), 381-391.

Flapper, B. C. T., & Schoemaker, M. M. (2013). Developmental coordination disorder in children with specific language impairment : Co-morbidity and impact on quality of life. *Research in Developmental Disabilities*, 34(2), 756-763.

<https://doi.org/10.1016/j.ridd.2012.10.014>

Fogel, Y., Stuart, N., Joyce, T., & Barnett, A. L. (2023). Relationships between motor skills and executive functions in developmental coordination disorder (DCD) : A systematic review. *Scandinavian Journal of Occupational Therapy*, 30(3), 344-356.

<https://doi.org/10.1080/11038128.2021.2019306>

Forestier, N., Terrier, R., & Teasdale, N. (2015). Ankle muscular proprioceptive signals' relevance for balance control on various support surfaces : An exploratory study. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 94(1), 20-27.

<https://doi.org/10.1097/PHM.0000000000000137>

Forgaard, C. J., Reschechtko, S., Gribble, P. L., & Pruszynski, J. A. (2021). Skin and muscle receptors shape coordinated fast feedback responses in the upper limb. *Current Opinion in Physiology*, 20, 198-205. <https://doi.org/10.1016/j.cophys.2021.02.001>

Franklin, D. W., So, U., Burdet, E., & Kawato, M. (2007). Visual feedback is not necessary for the learning of novel dynamics. *PloS One*, 2(12), e1336.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0001336>

Frens, M. A., & Van Opstal, A. J. (1995). A quantitative study of auditory-evoked saccadic eye movements in two dimensions. *Experimental Brain Research*, 107(1), 103-117.

<https://doi.org/10.1007/BF00228022>

- Frith, C. D., Blakemore, S. J., & Wolpert, D. M. (2000). Abnormalities in the awareness and control of action. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 355(1404), 1771. <https://doi.org/10.1098/rstb.2000.0734>
- Fuelscher, I., Williams, J., Enticott, P. G., & Hyde, C. (2015). Reduced motor imagery efficiency is associated with online control difficulties in children with probable developmental coordination disorder. *Research in Developmental Disabilities*, 45-46, 239-252. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2015.07.027>
- Fumeaux, P., Mercier, C., Roche, S., Iwaz, J., Stéphan, P., & Revol, O. (2021). Validation of the French Version of Conners' Parent Rating Scale–Revised, Short Form in ADHD-Diagnosed Children and Comparison With Control Children. *Journal of Attention Disorders*, 25(1), 124-133. <https://doi.org/10.1177/1087054718763908>
- Fumeaux, P., Roche, S., Mercier, C., Iwaz, J., Bader, M., Stéphan, P., Écochard, R., & Revol, O. (2020). Validation of the French Version of Conners' Parent Rating Scale–Revised, Short Version (CPRS-R:S) : Scale Measurement Invariance by Sex and Age. *Journal of Attention Disorders*, 24(12), 1693-1700. <https://doi.org/10.1177/1087054717696767>
- Gallagher, S. (1986). Body Image and Body Schema : A Conceptual Clarification. *Journal of Mind and Behavior*, 7(4), 541-554.
- Gambra, L., Cortese, S., Lizoain, P., Romero, D. R., Paiva, U., Gándara, C., Arrondo, G., & Magallón, S. (2024). Excessive body weight in developmental coordination disorder : A systematic review and meta-analysis. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 164, 105806. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2024.105806>
- Gauduel, T., Blondet, C., Gonzalez-Monge, S., Bonaiuto, J., & Gomez, A. (2024). Alteration of body representation in typical and atypical motor development. *Developmental Science*, 27(3), e13455. <https://doi.org/10.1111/desc.13455>
- Gentilucci, M., Toni, I., Daprati, E., & Gangitano, M. (1997). Tactile input of the hand and the control of reaching to grasp movements. *Experimental Brain Research*, 114(1), 130-137. <https://doi.org/10.1007/pl00005612>
- Gheysen, F., Van Waelvelde, H., & Fias, W. (2011). Impaired visuo-motor sequence learning in Developmental Coordination Disorder. *Research in Developmental Disabilities*, 32(2), 749-756. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2010.11.005>

- Goble, D. J. (2010). Proprioceptive Acuity Assessment Via Joint Position Matching : From Basic Science to General Practice. *Physical Therapy, 90*(8), 1176-1184.
<https://doi.org/10.2522/ptj.20090399>
- Goble, D. J., & Brown, S. H. (2010). Upper limb asymmetries in the perception of proprioceptively determined dynamic position sense. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 36*(3), 768-775. <https://doi.org/10.1037/a0018392>
- Goettker, A., Fiehler, K., & Voudouris, D. (2020). Somatosensory target information is used for reaching but not for saccadic eye movements. *Journal of Neurophysiology, 124*(4), 1092-1102. <https://doi.org/10.1152/jn.00258.2020>
- Gomez, A., & Huron, C. (2020). Subitizing and counting impairments in children with developmental coordination disorder. *Research in Developmental Disabilities, 104*, 103717. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2020.103717>
- Gomez, A., Piazza, M., Jobert, A., Dehaene-Lambertz, G., Dehaene, S., & Huron, C. (2015). Mathematical difficulties in developmental coordination disorder : Symbolic and nonsymbolic number processing. *Research in Developmental Disabilities, 43-44*, 167-178.
<https://doi.org/10.1016/j.ridd.2015.06.011>
- Gomez, A., Piazza, M., Jobert, A., Dehaene-Lambertz, G., & Huron, C. (2017). Numerical abilities of school-age children with Developmental Coordination Disorder (DCD) : A behavioral and eye-tracking study. *Human Movement Science, 55*, 315-326.
<https://doi.org/10.1016/j.humov.2016.08.008>
- Gomez, A., & Sirigu, A. (2015). Developmental coordination disorder : Core sensori-motor deficits, neurobiology and etiology. *Neuropsychologia, 79*, 272-287.
<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.09.032>
- Gómez-Moya, R., Diaz, R., Vaca-Palomares, I., & Fernandez-Ruiz, J. (2020). Procedural and Strategic Visuomotor Learning Deficits in Children With Developmental Coordination Disorder. *Research Quarterly for Exercise and Sport, 91*(3), 386-393.
<https://doi.org/10.1080/02701367.2019.1675852>
- Gonzalez, C. C., Mon-Williams, M., Burke, S., & Burke, M. R. (2016). Cognitive Control of Saccadic Eye Movements in Children with Developmental Coordination Disorder. *PLOS ONE, 11*(11), e0165380. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0165380>

- Goodale, M. A., Pelisson, D., & Prablanc, C. (1986). Large adjustments in visually guided reaching do not depend on vision of the hand or perception of target displacement. *Nature*, *320*(6064), 748-750. <https://doi.org/10.1038/320748a0>
- Gras, D., Ploix Maes, E., Doulazmi, M., Huron, C., Galléa, C., Boespflug Tanguy, O., Germanaud, D., & Roze, E. (2023a). Developmental coordination disorder subtypes in children : An unsupervised clustering. *Developmental Medicine & Child Neurology*, *65*(10), 1332-1342. <https://doi.org/10.1111/dmcn.15563>
- Gras, D., Ploix Maes, E., Doulazmi, M., Huron, C., Galléa, C., Boespflug Tanguy, O., Germanaud, D., & Roze, E. (2023b). Developmental coordination disorder subtypes in children : An unsupervised clustering. *Developmental Medicine & Child Neurology*, *dmcn.15563*. <https://doi.org/10.1111/dmcn.15563>
- Griffiths, A., Toovey, R., Morgan, P. E., & Spittle, A. J. (2018). Psychometric properties of gross motor assessment tools for children : A systematic review. *BMJ Open*, *8*(10), e021734. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2018-021734>
- Groh, J. M., & Sparks, D. L. (1996). Saccades to somatosensory targets. I. behavioral characteristics. *Journal of Neurophysiology*, *75*(1), 412-427. <https://doi.org/10.1152/jn.1996.75.1.412>
- Hallett, P. E., & Lightstone, A. D. (1976). Saccadic eye movements to flashed targets. *Vision Research*, *16*(1), 107-114. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(76\)90084-5](https://doi.org/10.1016/0042-6989(76)90084-5)
- Han, J., Anson, J., Waddington, G., Adams, R., & Liu, Y. (2015). The Role of Ankle Proprioception for Balance Control in relation to Sports Performance and Injury. *BioMed Research International*, *2015*, 842804. <https://doi.org/10.1155/2015/842804>
- Han, J., Waddington, G., Adams, R., Anson, J., & Liu, Y. (2016). Assessing proprioception : A critical review of methods. *Journal of Sport and Health Science*, *5*(1), 80-90. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2014.10.004>
- Head, H., & Holmes, G. (1911). Sensory disturbances from cerebral lesions. *Brain*, *34*, 103-254.
- Henderson, L., Rose, P., & Henderson, S. (1992). Reaction Time and Movement Time in Children with a Developmental Coordination Disorder. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *33*(5), 895-905. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1992.tb01963.x>

- Henderson, S. E., Sugden, D. A., & Barnett, A. L. (2007). *Movement assessment battery for children-2 : Movement ABC-2 : Examiner's manual* (Pearson).
- Hepp-Reymond, M.-C., Chakarov, V., Schulte-Mönting, J., Huethe, F., & Kristeva, R. (2009). Role of proprioception and vision in handwriting. *Brain Research Bulletin*, 79(6), 365-370. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2009.05.013>
- Hermisdörfer, J., Elias, Z., Cole, J. D., Quaney, B. M., & Nowak, D. A. (2008). Preserved and impaired aspects of feed-forward grip force control after chronic somatosensory deafferentation. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 22(4), 374-384. <https://doi.org/10.1177/1545968307311103>
- Hernandez-Castillo, C. R., Maeda, R. S., Pruszynski, J. A., & Diedrichsen, J. (2020). Sensory information from a slipping object elicits a rapid and automatic shoulder response. *Journal of Neurophysiology*, 123(3), 1103-1112. <https://doi.org/10.1152/jn.00672.2019>
- Hill, E. L., Brown, D., & Sophia Sorgardt, K. (2011). A Preliminary Investigation of Quality of Life Satisfaction Reports in Emerging Adults With and Without Developmental Coordination Disorder. *Journal of Adult Development*, 18(3), 130-134. <https://doi.org/10.1007/s10804-011-9122-2>
- Hoare, D., & Larkin, D. (1991). KINAESTHETIC ABILITIES OF CLUMSY CHILDREN. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 33(8), 671-678. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.1991.tb14944.x>
- Holst-Wolf, J. M., Yeh, I.-L., & Konczak, J. (2016). Development of Proprioceptive Acuity in Typically Developing Children : Normative Data on Forearm Position Sense. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00436>
- Horváth, Á., Ferentzi, E., Schwartz, K., Jacobs, N., Meyns, P., & Köteles, F. (2023). The measurement of proprioceptive accuracy : A systematic literature review. *Journal of Sport and Health Science*, 12(2), 219-225. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2022.04.001>
- Hothorn, T., Bretz, F., & Westfall, P. (2008). Simultaneous inference in general parametric models. *Biometrical Journal. Biometrische Zeitschrift*, 50(3), 346-363. <https://doi.org/10.1002/bimj.200810425>
- Hulme, C., Biggerstaff, A., Moran, G., & McKinlay, I. (1982). Visual, kinaesthetic and cross-modal judgements of length by normal and clumsy children. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 24(4), 461-471. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.1982.tb13650.x>

- Hyde, C., Fuelscher, I., Buckthought, K., Enticott, P. G., Gitay, M. A., & Williams, J. (2014). Motor imagery is less efficient in adults with probable developmental coordination disorder : Evidence from the hand rotation task. *Research in Developmental Disabilities, 35*(11), 3062-3070. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2014.07.042>
- Hyde, C., Fuelscher, I., Williams, J., Lum, J. A. G., He, J., Barhoun, P., & Enticott, P. G. (2018). Corticospinal excitability during motor imagery is reduced in young adults with developmental coordination disorder. *Research in Developmental Disabilities, 72*, 214-224. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2017.11.009>
- Hyde, C., & Wilson, P. (2011a). Online motor control in children with developmental coordination disorder : Chronometric analysis of double-step reaching performance: Online motor control in children with developmental coordination disorder. *Child: Care, Health and Development, 37*(1), 111-122. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2214.2010.01131.x>
- Hyde, C., & Wilson, P. H. (2011b). Dissecting online control in Developmental Coordination Disorder : A kinematic analysis of double-step reaching. *Brain and Cognition, 75*(3), 232-241. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2010.12.004>
- Ingram, L. A., Butler, A. A., Gandevia, S. C., & Walsh, L. D. (2019). Proprioceptive measurements of perceived hand position using pointing and verbal localisation tasks. *PLOS ONE, 14*(1), e0210911. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0210911>
- INSERM. (2019). *Trouble développemental de la coordination ou dyspraxie—Expertise collective* (EDP Sciences).
- Ip, A., Mickelson, E. C. R., & Zwicker, J. G. (2021). Assessment, diagnosis, and management of developmental coordination disorder. *Paediatrics & Child Health, 26*(6), 375-378. <https://doi.org/10.1093/pch/pxab047>
- Jeannerod, M. (2006). *Motor Cognition : What Actions Tell to the Self*. Oxford University Press.
- Jeannerod, M., Michel, F., & Prablanc, C. (1984). The control of hand movements in a case of hemianaesthesia following a parietal lesion. *Brain: A Journal of Neurology, 107* (Pt 3), 899-920. <https://doi.org/10.1093/brain/107.3.899>
- Job, X. E., Brady, D., de Fockert, J. W., Luft, C. D. B., Hill, E. L., & van Velzen, J. (2019). Adults with probable developmental coordination disorder selectively process early visual,

but not tactile information during action preparation. An electrophysiological study. *Human Movement Science*, 66, 631-644. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2019.02.018>

Johansson, R. S. (2002). Dynamic use of tactile afferent signals in control of dexterous manipulation. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 508, 397-410. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0713-0_45

Johnston, J. S., Begum Ali, J., Hill, E. L., & Bremner, A. J. (2017). Tactile localization performance in children with developmental coordination disorder (DCD) corresponds to their motor skill and not their cognitive ability. *Human Movement Science*, 53, 72-83. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2016.12.008>

Jover, M., Schmitz, C., Centelles, L., Chabrol, B., & Assaiante, C. (2010). Anticipatory postural adjustments in a bimanual load-lifting task in children with developmental coordination disorder : Postural Anticipation in Children with DCD. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 52(9), 850-855. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2009.03611.x>

Kadesjo, B., & Gillberg, C. (1999). Developmental Coordination Disorder in Swedish 7-Year-Old Children. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 38(7), 820-828. <https://doi.org/10.1097/00004583-199907000-00011>

Kagerer, F. A., Bo, J., Contreras-Vidal, J. L., & Clark, J. E. (2004). Visuomotor Adaptation in Children with Developmental Coordination Disorder. *Motor Control*, 8(4), 450-460. <https://doi.org/10.1123/mcj.8.4.450>

Kagerer, F. A., Contreras-Vidal, J. L., Bo, J., & Clark, J. E. (2006). Abrupt, but not gradual visuomotor distortion facilitates adaptation in children with developmental coordination disorder. *Human Movement Science*, 12.

Kagerer, F. A., Contreras-Vidal, J. L., & Stelmach, G. E. (1997). Adaptation to gradual as compared with sudden visuo-motor distortions. *Experimental Brain Research*, 115(3), 557-561. <https://doi.org/10.1007/pl00005727>

Kaplan, B. J., N. Wilson, B., Dewey, D., & Crawford, S. G. (1998). DCD may not be a discrete disorder. *Human Movement Science*, 17(4), 471-490. [https://doi.org/10.1016/S0167-9457\(98\)00010-4](https://doi.org/10.1016/S0167-9457(98)00010-4)

Katschmarsky, S., Cairney, S., Maruff, P., Wilson, P. H., & Currie, J. (2001). The ability to execute saccades on the basis of efference copy : Impairments in double-step saccade

- performance in children with developmental co-ordination disorder. *Experimental Brain Research*, 136(1), 73-78. <https://doi.org/10.1007/s002210000535>
- Kawato, M. (1999). Internal models for motor control and trajectory planning. *Current Opinion in Neurobiology*, 9(6), 718-727. [https://doi.org/10.1016/S0959-4388\(99\)00028-8](https://doi.org/10.1016/S0959-4388(99)00028-8)
- Keizer, A., Smeets, M. A. M., Dijkerman, H. C., van den Hout, M., Klugkist, I., van Elburg, A., & Postma, A. (2011). Tactile body image disturbance in anorexia nervosa. *Psychiatry Research*, 190(1), 115-120. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2011.04.031>
- Kirby, A. (2011). *The adult dcd/dyspraxia checklist (ADC) instructions for use (Kirby & Rosenblum, 2008) revision of scoring (2011)*. <https://dyspraxiaaction.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/10/the-adult-dcd-guidelines-2011.pdf>
- Kirby, A., Edwards, L., & Sugden, D. (2011). Emerging adulthood in developmental co-ordination disorder : Parent and young adult perspectives. *Research in Developmental Disabilities*, 32(4), 1351-1360. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.01.041>
- Kirby, A., Edwards, L., Sugden, D., & Rosenblum, S. (2010). The development and standardization of the Adult Developmental Co-ordination Disorders/Dyspraxia Checklist (ADC). *Research in Developmental Disabilities*, 31(1), 131-139. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2009.08.010>
- Klautke, J., Foster, C., Medendorp, W. P., & Heed, T. (2022). *Dynamic spatial coding in parietal cortex mediates tactile-motor transformation* [Preprint]. Neuroscience. <https://doi.org/10.1101/2022.11.12.516245>
- Ko, S.-U., Simonsick, E. M., Deshpande, N., Studenski, S., & Ferrucci, L. (2016). Ankle Proprioception-Associated Gait Patterns in Older Adults : Results from the Baltimore Longitudinal Study of Aging. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 48(11). <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001017>
- Krakauer, J. W. (2009). Motor Learning and Consolidation : The Case of Visuomotor Rotation. In D. Sternad (Éd.), *Progress in Motor Control : A Multidisciplinary Perspective* (p. 405-421). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-77064-2_21
- Kuznetsova, A., Brockhoff, P. B., & Christensen, R. H. B. (2017). lmerTest Package : Tests in Linear Mixed Effects Models. *Journal of Statistical Software*, 82, 1-26. <https://doi.org/10.18637/jss.v082.i13>

- Lachambre, C., Proteau-Lemieux, M., Lepage, J.-F., Bussi eres, E.-L., & Lipp e, S. (2021). Attentional and executive functions in children and adolescents with developmental coordination disorder and the influence of comorbid disorders : A systematic review of the literature. *PLoS One*, *16*(6), e0252043. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252043>
- Langaas, T., Mon-Williams, M., Wann, J. P., Pascal, E., & Thompson, C. (1998). Eye movements, prematurity and developmental co-ordination disorder. *Vision Research*, *38*(12), 1817-1826. [https://doi.org/10.1016/s0042-6989\(97\)00399-4](https://doi.org/10.1016/s0042-6989(97)00399-4)
- Laszlo, J. I., & Bairstow, P. J. (1985). *Perceptual-motor Behaviour : Developmental Assessment and Therapy*. Holt, Rinehart and Winston.
- Laszlo, J. I., & Bairstow, P. J. (1980). The Measurement of Kinaesthetic Sensitivity in Children and Adults. *Developmental Medicine & Child Neurology*, *22*(4), 454-464. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.1980.tb04350.x>
- Law, S.-H., Lo, S. K., Chow, S., & Cheing, G. L. Y. (2011). Grip force control is dependent on task constraints in children with and without developmental coordination disorder: *International Journal of Rehabilitation Research*, *34*(2), 93-99. <https://doi.org/10.1097/MRR.0b013e32833f0519>
- Lebon, F., Gueugneau, N., & Papaxanthis, C. (2013). Mod eles internes et imagerie motrice. *Movement & Sport Sciences - Science & Motricit e*, 51-61. <https://doi.org/10.1051/sm/20103092>
- Lejeune, C., Catale, C., Willems, S., & Meulemans, T. (2013). Intact procedural motor sequence learning in developmental coordination disorder. *Research in Developmental Disabilities*, *34*(6), 1974-1981. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2013.03.017>
- Lejeune, C., Wansard, M., Geurten, M., & Meulemans, T. (2016). Procedural learning, consolidation, and transfer of a new skill in Developmental Coordination Disorder. *Child Neuropsychology: A Journal on Normal and Abnormal Development in Childhood and Adolescence*, *22*(2), 143-154. <https://doi.org/10.1080/09297049.2014.988608>
- Li, H., Ke, X., Huang, D., Xu, X., Tian, H., Gao, J., Jiang, C., & Song, W. (2024). The prevalence of developmental coordination disorder in children : A systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Pediatrics*, *12*, 1387406. <https://doi.org/10.3389/fped.2024.1387406>

- Li, K., Su, W., Fu, H., & Pickett, K. A. (2015). Kinesthetic deficit in children with developmental coordination disorder. *Research in Developmental Disabilities, 38*, 125-133. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2014.12.013>
- Licari, M. K., Reynolds, J. E., Tidman, S., Ndiaye, S., Sekaran, S. N., Reid, S. L., & Lay, B. S. (2018). Visual tracking behaviour of two-handed catching in boys with developmental coordination disorder. *Research in Developmental Disabilities, 83*, 280-286. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2018.07.005>
- Loftesnes, J. M., Ingvaldsen, R. P., & Sigmundsson, H. (2017). Children With Developmental Coordination Disorder : Can Underlying Perceptual Disability be Remediated Through Specific Training? *Psychological Reports, 120*(2), 242-254. <https://doi.org/10.1177/0033294116687761>
- Longo, M. R. (2017). Expansion of Perceptual Body Maps Near – But Not Across – The Wrist. *Frontiers in Human Neuroscience, 11*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00111>
- Longo, M. R. (2022). Distortion of mental body representations. *Trends in Cognitive Sciences, 26*(3), 241-254. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2021.11.005>
- Longo, M. R., & Haggard, P. (2010). An implicit body representation underlying human position sense. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 107*(26), 11727-11732. <https://doi.org/10.1073/pnas.1003483107>
- Longo, M. R., Mancini, F., & Haggard, P. (2015). Implicit body representations and tactile spatial remapping. *Acta Psychologica, 160*, 77-87. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2015.07.002>
- Lord, R., & Hulme, C. (1987). Kinaesthetic Sensitivity Of Normal And Clumsy Children. *Developmental Medicine & Child Neurology, 29*(6), 720-725. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.1987.tb08816.x>
- Lust, J. M., Steenbergen, B., Diepstraten, J. (Ankie) E. M., Wilson, P. H., Schoemaker, M. M., & Poelma, M. J. (2022). The subtypes of developmental coordination disorder. *Developmental Medicine & Child Neurology, dmcn.15260*. <https://doi.org/10.1111/dmcn.15260>
- Magalhães, L. C., Cardoso, A. A., & Missiuna, C. (2011). Activities and participation in children with developmental coordination disorder : A systematic review. *Research in Developmental Disabilities, 32*(4), 1309-1316. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.01.029>

- Manson, G. A., Blouin, J., Kumawat, A. S., Crainic, V. A., & Tremblay, L. (2019). Rapid online corrections for upper limb reaches to perturbed somatosensory targets : Evidence for non-visual sensorimotor transformation processes. *Experimental Brain Research*, 237(3), 839-853. <https://doi.org/10.1007/s00221-018-5448-3>
- Martel, M., Boulenger, V., Koun, E., Finos, L., Farnè, A., & Roy, A. C. (2022). Body schema plasticity is altered in Developmental Coordination Disorder. *Neuropsychologia*, 166, 108136. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2021.108136>
- Martel, M., Cardinali, L., Bertoni, G., Jouffrais, C., Finos, L., Farnè, A., & Roy, A. C. (2019). Somatosensory-guided tool use modifies arm representation for action. *Scientific Reports*, 9(1), 5517. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41928-1>
- Martel, M., Cardinali, L., Roy, A. C., & Farnè, A. (2016). Tool-use : An open window into body representation and its plasticity. *Cognitive Neuropsychology*, 33(1-2), 82-101. <https://doi.org/10.1080/02643294.2016.1167678>
- Martel, M., Finos, L., Bahmad, S., Koun, E., Salemme, R., Sonié, S., Fournier, P., Schmitz, C., & Roy, A. C. (2024). Motor deficits in autism differ from that of developmental coordination disorder. *Autism: The International Journal of Research and Practice*, 28(2), 415-432. <https://doi.org/10.1177/13623613231171980>
- Martel, M., Finos, L., Koun, E., Farnè, A., & Roy, A. C. (2021). The long developmental trajectory of body representation plasticity following tool use. *Scientific Reports*, 11(1), 559. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79476-8>
- Martel, M., Fournier, P., Finos, L., Schmitz, C., & Roy, A. C. (2019). Highs and Lows in Motor Control Development. *Journal of Motor Behavior*, 1-14. <https://doi.org/10.1080/00222895.2019.1643283>
- Matsumiya, K. (2022). Multiple representations of the body schema for the same body part. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(4), e2112318119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2112318119>
- Matthews, P. B. (1988). Proprioceptors and their contribution to somatosensory mapping : Complex messages require complex processing. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 66(4), 430-438. <https://doi.org/10.1139/y88-073>

- Mays, L. E., & Sparks, D. L. (1980). Dissociation of visual and saccade-related responses in superior colliculus neurons. *Journal of Neurophysiology*, *43*(1), 207-232.
<https://doi.org/10.1152/jn.1980.43.1.207>
- McGuire, L. M. M., & Sabes, P. N. (2009). Sensory transformations and the use of multiple reference frames for reach planning. *Nature Neuroscience*, *12*(8), 1056-1061.
<https://doi.org/10.1038/nn.2357>
- Meachon, E. J., Beitz, C., Zemp, M., Wilmut, K., & Alpers, G. W. (2022). The adult developmental coordination disorders/dyspraxia checklist - German : Adapted factor structure for the differentiation of DCD and ADHD. *Research in Developmental Disabilities*, *126*, 104254. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2022.104254>
- Medendorp, W. P., & Heed, T. (2019). State estimation in posterior parietal cortex : Distinct poles of environmental and bodily states. *Progress in Neurobiology*, *183*, 101691.
<https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2019.101691>
- Medina, J., & Coslett, H. B. (2010). From maps to form to space : Touch and the body schema. *Neuropsychologia*, *48*(3), 645-654.
<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.08.017>
- Medina, J., & Coslett, H. B. (2016a). What can errors tell us about body representations? *Cognitive Neuropsychology*, *33*(1-2), 5-25. <https://doi.org/10.1080/02643294.2016.1188065>
- Medina, J., & Coslett, H. B. (2016b). What can errors tell us about body representations? *Cognitive Neuropsychology*, *33*(1-2), 5-25. <https://doi.org/10.1080/02643294.2016.1188065>
- Messier, J., Adamovich, S., Berkinblit, M., Tunik, E., & Poizner, H. (2003). Influence of movement speed on accuracy and coordination of reaching movements to memorized targets in three-dimensional space in a deafferented subject. *Experimental Brain Research*, *150*(4), 399-416. <https://doi.org/10.1007/s00221-003-1413-9>
- Miall, R. C., Kitchen, N. M., Nam, S.-H., Lefumat, H., Renault, A. G., Ørstavik, K., Cole, J. D., & Sarlegna, F. R. (2018). Proprioceptive loss and the perception, control and learning of arm movements in humans : Evidence from sensory neuronopathy. *Experimental Brain Research*, *236*(8), 2137-2155. <https://doi.org/10.1007/s00221-018-5289-0>
- Mon-Williams, M. A., Wann, J. P., & Pascal, E. (1999). Visual-proprioceptive mapping in children with developmental coordination disorder. *Developmental Medicine and Child Neurology*, *41*(4), 247-254. <https://doi.org/10.1017/s0012162299000523>

- Mon-Williams, M., Tresilian, J. R., Bell, V. E., Coppard, V. L., Nixdorf, M., & Carson, R. G. (2005). The preparation of reach-to-grasp movements in adults, children, and children with movement problems. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology A: Human Experimental Psychology*, *58A*(7), 1249-1263. <https://doi.org/10.1080/02724980443000575>
- Mora, L., Cowie, D., Banissy, M. J., & Cocchini, G. (2018). My true face : Unmasking one's own face representation. *Acta Psychologica*, *191*, 63-68. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2018.08.014>
- Mosca, S. J., Langevin, L. M., Dewey, D., Innes, A. M., Lionel, A. C., Marshall, C. C., Scherer, S. W., Parboosingh, J. S., & Bernier, F. P. (2016). Copy-number variations are enriched for neurodevelopmental genes in children with developmental coordination disorder. *Journal of Medical Genetics*, *53*(12), 812-819. <https://doi.org/10.1136/jmedgenet-2016-103818>
- Mueller, S., & Fiehler, K. (2014). Effector movement triggers gaze-dependent spatial coding of tactile and proprioceptive-tactile reach targets. *Neuropsychologia*, *62*, 184-193. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2014.07.025>
- Naffrechoux, M., Koun, E., Volland, F., Farnè, A., Roy, A. C., & Péliesson, D. (2024). Eyes and hand are both reliable at localizing somatosensory targets. *Experimental Brain Research*. <https://doi.org/10.1007/s00221-024-06922-8>
- Nemmi, F., Cignetti, F., Vaugoyeau, M., Assaiante, C., Chaix, Y., & Péran, P. (2023). Developmental dyslexia, developmental coordination disorder and comorbidity discrimination using multimodal structural and functional neuroimaging. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, *160*, 43-54. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2022.10.016>
- Nobusako, S., Osumi, M., Furukawa, E., Nakai, A., Maeda, T., & Morioka, S. (2021). Increased visual bias in children with developmental coordination disorder : Evidence from a visual-tactile temporal order judgment task. *Human Movement Science*, *75*, 102743. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2020.102743>
- Nougier, V., Bard, C., Fleury, M., Teasdale, N., Cole, J., Forget, R., Paillard, J., & Lamarre, Y. (1996). Control of single-joint movements in deafferented patients : Evidence for amplitude coding rather than position control. *Experimental Brain Research*, *109*(3). <https://doi.org/10.1007/BF00229632>

- Nowak, D. A., Glasauer, S., & Hermsdorfer, J. (2004). How predictive is grip force control in the complete absence of somatosensory feedback? *Brain: A Journal of Neurology*, *127*(Pt 1), 182-192. <https://doi.org/10.1093/brain/awh016>
- O'Brien, J. C., Williams, H. G., Bundy, A., Lyons, J., & Mittal, A. (2008). Mechanisms That Underlie Coordination in Children With Developmental Coordination Disorder. *Journal of Motor Behavior*, *40*(1), 43-61. <https://doi.org/10.3200/JMBR.40.1.43-61>
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness : The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, *9*(1), 97-113. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(71\)90067-4](https://doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4)
- Paulignan, Y., MacKenzie, C., Marteniuk, R., & Jeannerod, M. (1991). Selective perturbation of visual input during prehension movements. 1. The effects of changing object position. *Experimental Brain Research*, *83*(3), 502-512. <https://doi.org/10.1007/BF00229827>
- Péllisson, D., Prablanc, C., Goodale, M. A., & Jeannerod, M. (1986). Visual control of reaching movements without vision of the limb. *Experimental Brain Research*, *62*(2), 303-311. <https://doi.org/10.1007/BF00238849>
- Peviani, V., & Bottini, G. (2018). The distorted hand metric representation serves both perception and action. *Journal of Cognitive Psychology*, *30*(8), 880-893. <https://doi.org/10.1080/20445911.2018.1538154>
- Peviani, V., Liotta, J., & Bottini, G. (2020). The motor system (partially) deceives body representation biases in absence of visual correcting cues. *Acta Psychologica*, *203*, 103003. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2020.103003>
- Piek, J. P., & Coleman-Carman, R. (1995). Kinaesthetic sensitivity and motor performance of children with Developmental Coordination Disorder. *Developmental Medicine & Child Neurology*, *37*(11), 976-984. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.1995.tb11952.x>
- Piek, J. P., Dyck, M. J., Francis, M., & Conwell, A. (2007). Working memory, processing speed, and set-shifting in children with developmental coordination disorder and attention-deficit-hyperactivity disorder. *Developmental Medicine and Child Neurology*, *49*(9), 678-683. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2007.00678.x>
- Pierrot-Deseilligny, C., Müri, R. M., Ploner, C. J., Gaymard, B., & Rivaud-Péchoux, S. (2003). Cortical control of ocular saccades in humans : A model for motricity. In *Progress in Brain Research* (Vol. 142, p. 3-17). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(03\)42003-7](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(03)42003-7)

- Pierrot-Deseilligny, C., Rivaud, S., Gaymard, B., & Agid, Y. (1991). Cortical control of reflexive visually-guided saccades. *Brain: A Journal of Neurology*, *114* (Pt 3), 1473-1485. <https://doi.org/10.1093/brain/114.3.1473>
- Pieters, S., Desoete, A., Van Waelvelde, H., Vanderswalmen, R., & Roeyers, H. (2012). Mathematical problems in children with developmental coordination disorder. *Research in Developmental Disabilities*, *33*(4), 1128-1135. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2012.02.007>
- Pipereit, K., Bock, O., & Vercher, J.-L. (2006). The contribution of proprioceptive feedback to sensorimotor adaptation. *Experimental Brain Research*, *174*(1), 45-52. <https://doi.org/10.1007/s00221-006-0417-7>
- Pisella, L., André, V., Gavault, E., Le Flem, A., Luc-Pupat, E., Glissoux, C., Barrière, A., Vindras, P., Rossetti, Y., & Gonzalez-Monge, S. (2013). A test revealing the slow acquisition and the dorsal stream substrate of visuo-spatial perception. *Neuropsychologia*, *51*(1), 106-113. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2012.11.015>
- Pisella, L., Martel, M., Roy, A. C., Vuillerot, C., & Gonzalez-Monge, S. (2019). Validation of a simple screening test for elementary visuo-spatial perception deficit. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2019.03.006>
- Pisella, L., Martel, M., Roy, A. C., Vuillerot, C., & Gonzalez-Monge, S. (2020). Validation of a simple screening test for elementary visuo-spatial perception deficit. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, *63*(4), 302-308. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2019.03.006>
- Pisella, L., Vialatte, A., Martel, M., Prost-Lefebvre, M., Caton, M., Stalder, M., Yssad, R., Roy, A. C., Vuillerot, C., & Gonzalez-Monge, S. (2021). Elementary visuospatial perception deficit in children with neurodevelopmental disorders. *Developmental Medicine & Child Neurology*, *63*(4), 457-464. <https://doi.org/10.1111/dmcn.14743>
- Plumb, M. S., Wilson, A. D., Mulroue, A., Brockman, A., Williams, J. H. G., & Mon-Williams, M. (2008). Online corrections in children with and without DCD. *Human Movement Science*, *10*.
- Prablanc, C., Echallier, J. E., Jeannerod, M., Komilis, E., & de NeuropsychologieExp, L. (1979). Optimal response of eye and hand motor systems in pointing at a visual target; part II. *Biological Cybernetics*, *35*, 183-187. <https://doi.org/10.1007/BF00337063>

- Prablanc, C., Echallier, J. F., Komilis, E., & Jeannerod, M. (1979). Optimal response of eye and hand motor systems in pointing at a visual target; part I. *Biological Cybernetics*, 35, 113-124. <https://doi.org/10.1007/BF00337436>
- Prablanc, C., Pélisson, D., & Goodale, M. A. (1986). Visual control of reaching movements without vision of the limb. I. Role of retinal feedback of target position in guiding the hand. *Experimental Brain Research*, 62(2), 293-302. <https://doi.org/10.1007/BF00238848>
- Ramachandran, V. S., & Hirstein, W. (1998). The perception of phantom limbs. The D. O. Hebb lecture. *Brain: A Journal of Neurology*, 121 (Pt 9), 1603-1630. <https://doi.org/10.1093/brain/121.9.1603>
- Rao, A. K., & Gordon, A. M. (2001). Contribution of tactile information to accuracy in pointing movements. *Experimental Brain Research*, 138(4), 438-445. <https://doi.org/10.1007/s002210100717>
- Rihtman, T., Wilson, B. N., & Parush, S. (2011). Development of the Little Developmental Coordination Disorder Questionnaire for preschoolers and preliminary evidence of its psychometric properties in Israel. *Research in Developmental Disabilities*, 32(4), 1378-1387. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2010.12.040>
- Robert, M. P., Ingster-Moati, I., Albuisson, E., Cabrol, D., Golse, B., & Vaivre-Douret, L. (2014). Vertical and horizontal smooth pursuit eye movements in children with developmental coordination disorder. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 56(6), 595-600. <https://doi.org/10.1111/dmcn.12384>
- Rosenbaum, D. A., Marchak, F., Barnes, H. J., Vaughan, J., Slotta, J. D., & Jorgensen, M. J. (1990). Constraints for action selection : Overhand versus underhand grips. In *Attention and performance 13 : Motor representation and control* (p. 321-342). Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Rothwell, J. C., Traub, M. M., Day, B. L., Obeso, J. A., Thomas, P. K., & Marsden, C. D. (1982). Manual motor performance in a deafferented man. *Brain*, 105(3), 515-542. <https://doi.org/10.1093/brain/105.3.515>
- Rusconi, E., Gonzaga, M., Adriani, M., Braun, C., & Haggard, P. (2009). Know thyself : Behavioral evidence for a structural representation of the human body. *PloS One*, 4(5), e5418. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0005418>

- Saal, H. P., & Bensmaia, S. J. (2014). Touch is a team effort : Interplay of submodalities in cutaneous sensibility. *Trends in Neurosciences*, 37(12), 689-697.
<https://doi.org/10.1016/j.tins.2014.08.012>
- Sainburg, R. L., Ghilardi, M. F., Poizner, H., & Ghez, C. (1995). Control of limb dynamics in normal subjects and patients without proprioception. *Journal of Neurophysiology*, 73(2), 820-835. <https://doi.org/10.1152/jn.1995.73.2.820>
- Sainburg, R. L., Poizner, H., & Ghez, C. (1993). Loss of Proprioception Produces Deficits in Interjoint Coordination. *Journal of neurophysiology*, 70(5), 2136-2147.
<https://doi.org/10.1152/jn.1993.70.5.2136>
- Sarlegna, F. R., Gauthier, G. M., Bourdin, C., Vercher, J.-L., & Blouin, J. (2006). Internally driven control of reaching movements : A study on a proprioceptively deafferented subject. *Brain Research Bulletin*, 69(4), 404-415. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2006.02.005>
- Sarlegna, F. R., Malfait, N., Bringoux, L., Bourdin, C., & Vercher, J.-L. (2010). Force-field adaptation without proprioception : Can vision be used to model limb dynamics? *Neuropsychologia*, 48(1). <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.08.011>
- Sarlegna, F. R., Przybyla, A., & Sainburg, R. L. (2009). The influence of target sensory modality on motor planning may reflect errors in sensori-motor transformations. *Neuroscience*, 164(2), 597-610. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2009.07.057>
- Schaffer, J. E., Sarlegna, F. R., & Sainburg, R. L. (2021). A rare case of deafferentation reveals an essential role of proprioception in bilateral coordination. *Neuropsychologia*, 160, 107969. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2021.107969>
- Scheidt, R. A., Conditt, M. A., Secco, E. L., & Mussa-Ivaldi, F. A. (2005). Interaction of visual and proprioceptive feedback during adaptation of human reaching movements. *Journal of Neurophysiology*, 93(6), 3200-3213. <https://doi.org/10.1152/jn.00947.2004>
- Schlicht, E. J., & Schrater, P. R. (2007). Impact of coordinate transformation uncertainty on human sensorimotor control. *Journal of Neurophysiology*, 97(6), 4203-4214.
<https://doi.org/10.1152/jn.00160.2007>
- Schoemaker, M. M., Niemeijer, A. S., Flapper, B. C. T., & Smits-Engelsman, B. C. M. (2012). Validity and reliability of the Movement Assessment Battery for Children-2 Checklist for children with and without motor impairments : Validity of the MABC-2 Checklist.

Developmental Medicine & Child Neurology, 54(4), 368-375. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2012.04226.x>

Schoemaker, M. M., van der Wees, M., Flapper, B., Verheij-Jansen, N., Scholten-Jaegers, S., & Geuze, R. H. (2001). Perceptual skills of children with developmental coordination disorder. *Human Movement Science*, 20(1-2), 111-133. [https://doi.org/10.1016/S0167-9457\(01\)00031-8](https://doi.org/10.1016/S0167-9457(01)00031-8)

Schwoebel, J., & Coslett, H. B. (2005). Evidence for multiple, distinct representations of the human body. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17(4), 543-553. <https://doi.org/10.1162/0898929053467587>

Sciutti, A., Squeri, V., Gori, M., Masia, L., Sandini, G., & Konczak, J. (2010). Predicted sensory feedback derived from motor commands does not improve haptic sensitivity. *Experimental Brain Research*, 200(3), 259-267. <https://doi.org/10.1007/s00221-009-1996-x>

Scott-Roberts, S., & Purcell, C. (2018). Understanding the Functional Mobility of Adults with Developmental Coordination Disorder (DCD) Through the International Classification of Functioning (ICF). *Current Developmental Disorders Reports*, 5(1), 26-33. <https://doi.org/10.1007/s40474-018-0128-3>

Serino, A., & Haggard, P. (2010). Touch and the body. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 34(2), 224-236. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.04.004>

Shadmehr, R., & Krakauer, J. W. (2008). A computational neuroanatomy for motor control. *Experimental Brain Research*, 185(3), 359-381. <https://doi.org/10.1007/s00221-008-1280-5>

Sherrington, C. (1906). *The integrative action of the nervous system*. Cambridge University Press.

Sirigu, A., Grafman, J., Bressler, K., & Sunderland, T. (1991). Multiple representations contribute to body knowledge processing. Evidence from a case of autotopagnosia. *Brain: A Journal of Neurology*, 114 (Pt 1B), 629-642. <https://doi.org/10.1093/brain/114.1.629>

Smith, Y. A., Hong, E., & Presson, C. (2000). Normative and Validation studies of the Nine-Hole Peg Test with children. *Perceptual and Motor Skills*, 823-843. <https://doi.org/10.2466/pms.2000.90.3.823>

Smits-Engelsman, B., Bonney, E., & Ferguson, G. (2020). Motor skill learning in children with and without Developmental Coordination Disorder. *Human Movement Science*, 74, 102687. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2020.102687>

- Smits-Engelsman, B. C. M., Blank, R., van der Kaay, A.-C., Mosterd-van der Meijs, R., Vlugt-van den Brand, E., Polatajko, H. J., & Wilson, P. H. (2013). Efficacy of interventions to improve motor performance in children with developmental coordination disorder : A combined systematic review and meta-analysis. *Developmental Medicine and Child Neurology*, *55*(3), 229-237. <https://doi.org/10.1111/dmcn.12008>
- Smits-Engelsman, B. C. M., & Wilson, P. H. (2013). Noise, variability, and motor performance in developmental coordination disorder. *Developmental Medicine & Child Neurology*, *55*, 69-72. <https://doi.org/10.1111/dmcn.12311>
- Smyth, M. M., & Mason, U. C. (1997). Planning and Execution of Action in Children with and without Developmental Coordination Disorder. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *38*(8), 1023-1037. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1997.tb01619.x>
- Smyth, M. M., & Mason, U. C. (1998). Use of proprioception in normal and clumsy children. *Developmental Medicine & Child Neurology*, *40*(10), 672-681. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.1998.tb12327.x>
- Sobinov, A. R., & Bensmaia, S. J. (2021). The neural mechanisms of manual dexterity. *Nature Reviews. Neuroscience*, *22*(12), 741-757. <https://doi.org/10.1038/s41583-021-00528-7>
- Soechting, J. F., & Flanders, M. (1989). Sensorimotor representations for pointing to targets in three-dimensional space. *Journal of Neurophysiology*, *62*(2), 582-594. <https://doi.org/10.1152/jn.1989.62.2.582>
- Sommer, M. A., & Wurtz, R. H. (2008). Brain circuits for the internal monitoring of movements. *Annual Review of Neuroscience*, *31*, 317-338. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.31.060407.125627>
- Stone, K. D., Keizer, A., & Dijkerman, H. C. (2018). The influence of vision, touch, and proprioception on body representation of the lower limbs. *Acta Psychologica*, *185*, 22-32. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2018.01.007>
- Subara-Zukic, E., Cole, M. H., McGuckian, T. B., Steenbergen, B., Green, D., Smits-Engelsman, B. C., Lust, J. M., Abdollahipour, R., Domellöf, E., Deconinck, F. J. A., Blank, R., & Wilson, P. H. (2022). Behavioral and Neuroimaging Research on Developmental Coordination Disorder (DCD) : A Combined Systematic Review and Meta-Analysis of Recent Findings. *Frontiers in Psychology*, *13*, 809455. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.809455>

- Sullivan, A., Fitzmaurice, K., & Abel, L. A. (2004). Latency and accuracy of saccades to somatosensory targets. *Experimental Brain Research*, *154*(4), 407-410.
<https://doi.org/10.1007/s00221-003-1749-1>
- Summers, J., Larkin, D., & Dewey, D. (2008). Activities of daily living in children with developmental coordination disorder : Dressing, personal hygiene, and eating skills. *Human Movement Science*, *27*(2), 215-229. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2008.02.002>
- Sumner, E., & Hill, E. L. (2024). Oculomotor differences in adults with and without probable developmental coordination disorder. *Frontiers in Human Neuroscience*, *18*, 1280585.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2024.1280585>
- Sumner, E., Hutton, S. B., Kuhn, G., & Hill, E. L. (2018). Oculomotor atypicalities in Developmental Coordination Disorder. *Developmental Science*, *21*(1), e12501.
<https://doi.org/10.1111/desc.12501>
- Tal Saban, M., & Kirby, A. (2018). Adulthood in Developmental Coordination Disorder (DCD) : A Review of Current Literature Based on ICF Perspective. *Current Developmental Disorders Reports*, *5*(1), 9-17. <https://doi.org/10.1007/s40474-018-0126-5>
- Tal-Saban, M., Ornoy, A., & Parush, S. (2014). Young Adults With Developmental Coordination Disorder : A Longitudinal Study. *The American Journal of Occupational Therapy*, *68*(3), 307-316. <https://doi.org/10.5014/ajot.2014.009563>
- Tamè, L., Dransfield, E., Quettier, T., & Longo, M. R. (2017). Finger posture modulates structural body representations. *Scientific Reports*, *7*(1), 43019.
<https://doi.org/10.1038/srep43019>
- Tillery, S. I., Flanders, M., & Soechting, J. F. (1994). Errors in kinesthetic transformations for hand apposition. *Neuroreport*, *6*(1), 177-181. <https://doi.org/10.1097/00001756-199412300-00045>
- Todorov, E., & Jordan, M. I. (2002). Optimal feedback control as a theory of motor coordination. *Nature Neuroscience*, *5*(11), 1226-1235. <https://doi.org/10.1038/nn963>
- Tong, C., Wolpert, D. M., & Flanagan, J. R. (2002). Kinematics and dynamics are not represented independently in motor working memory : Evidence from an interference study. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, *22*(3), 1108-1113. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.22-03-01108.2002>

- Tsai, C.-L., Chang, Y.-K., Hung, T.-M., Tseng, Y.-T., & Chen, T.-C. (2012). The neurophysiological performance of visuospatial working memory in children with developmental coordination disorder. *Developmental Medicine and Child Neurology*, *54*(12), 1114-1120. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2012.04408.x>
- Tsai, C.-L., & Wu, S.-K. (2008). Relationship of visual perceptual deficit and motor impairment in children with developmental coordination disorder. *Perceptual and Motor Skills*, *107*(2), 457-472. <https://doi.org/10.2466/pms.107.2.457-472>
- Tseng, Y.-T., Holst-Wolf, J. M., Tsai, C.-L., Chen, F.-C., & Konczak, J. (2019). Haptic perception is altered in children with developmental coordination disorder. *Neuropsychologia*, *127*, 29-34. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2019.02.004>
- Tseng, Y.-T., Lin, Y.-H., Chen, Y.-W., Tsai, C.-L., & Chen, F.-C. (2022). Impaired wrist position sense is linked to motor abnormalities in young adults with a probable developmental coordination disorder. *Neuroscience Letters*, 136446. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2022.136446>
- Tseng, Y.-T., Tsai, C.-L., Chen, F.-C., & Konczak, J. (2018). Wrist position sense acuity and its relation to motor dysfunction in children with developmental coordination disorder. *Neuroscience Letters*, *674*, 106-111. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2018.03.031>
- Tseng, Y.-T., Tsai, C.-L., Chen, F.-C., & Konczak, J. (2019). Position Sense Dysfunction Affects Proximal and Distal Arm Joints in Children with Developmental Coordination Disorder. *Journal of Motor Behavior*, *51*(1), 49-58. <https://doi.org/10.1080/00222895.2017.1415200>
- Vaivre-Douret, L., Lalanne, C., Ingster-Moati, I., Boddaert, N., Cabrol, D., Dufier, J.-L., Golse, B., & Falissard, B. (2011). Subtypes of Developmental Coordination Disorder : Research on Their Nature and Etiology. *Developmental Neuropsychology*, *36*(5), 614-643. <https://doi.org/10.1080/87565641.2011.560696>
- Van Beers, R. J. (2007). The Sources of Variability in Saccadic Eye Movements. *The Journal of Neuroscience*, *27*(33), 8757-8770. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2311-07.2007>
- Van Beers, R. J., Haggard, P., & Wolpert, D. M. (2004). The Role of Execution Noise in Movement Variability. *Journal of Neurophysiology*, *91*(2), 1050-1063. <https://doi.org/10.1152/jn.00652.2003>

van der Linde, B. W., van Netten, J. J., Otten, E., Postema, K., Geuze, R. H., & Schoemaker, M. M. (2015). A systematic review of instruments for assessment of capacity in activities of daily living in children with developmental co-ordination disorder : Assessment of ADL in children with DCD. *Child: Care, Health and Development*, *41*(1), 23-34.

<https://doi.org/10.1111/cch.12124>

van Hoorn, J. F., Schoemaker, M. M., Stuive, I., Dijkstra, P. U., Rodrigues Trigo Pereira, F., van der Sluis, C. K., & Hadders-Algra, M. (2021). Risk factors in early life for developmental coordination disorder : A scoping review. *Developmental Medicine and Child Neurology*, *63*(5), 511-519. <https://doi.org/10.1111/dmcn.14781>

Van Waelvelde, H., De Weerd, W., De Cock, P., & Smits-Engelsman, B. C. (2004). Association between visual perceptual deficits and motor deficits in children with developmental coordination disorder. *Developmental Medicine & Child Neurology*, *46*(10). <https://doi.org/10.1017/S0012162204001112>

Viel, S., Vaugoyeau, M., & Assaiante, C. (2009). Adolescence : A Transient Period of Proprioceptive Neglect in Sensory Integration of Postural Control. *Motor Control*, *13*(1), 25-42. <https://doi.org/10.1123/mcj.13.1.25>

von Hofsten, C., & Rösblad, B. (1988). The integration of sensory information in the development of precise manual pointing. *Neuropsychologia*, *26*(6), 805-821. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(88\)90051-6](https://doi.org/10.1016/0028-3932(88)90051-6)

Voudouris, D., Goettker, A., Mueller, S., & Fiehler, K. (2016). Kinesthetic information facilitates saccades towards proprioceptive-tactile targets. *Vision Research*, *122*, 73-80. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2016.03.008>

Wang, J., & Lei, Y. (2015). Direct-effects and after-effects of visuomotor adaptation with one arm on subsequent performance with the other arm. *Journal of Neurophysiology*, *114*(1), 468-473. <https://doi.org/10.1152/jn.00298.2015>

Wann, J. P., & Ibrahim, S. F. (1992). Does limb proprioception drift? *Experimental Brain Research*, *91*(1), 162-166. <https://doi.org/10.1007/BF00230024>

Warlop, G., Vansteenkiste, P., Lenoir, M., & Deconinck, F. J. A. (2020). An exploratory study of gaze behaviour in young adults with developmental coordination disorder. *Human Movement Science*, *73*, 102656. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2020.102656>

- Willingham, D. B. (1998). A neuropsychological theory of motor skill learning. *Psychological Review*, *105*(3), 558-584. <https://doi.org/10.1037/0033-295x.105.3.558>
- Wilmot, K., & Byrne, M. (2014). Grip selection for sequential movements in children and adults with and without Developmental Coordination Disorder. *Human Movement Science*, *36*, 272-284. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2013.07.015>
- Wilmot, K., Byrne, M., & Barnett, A. L. (2013). Reaching to throw compared to reaching to place : A comparison across individuals with and without Developmental Coordination Disorder. *Research in Developmental Disabilities*, *34*(1), 174-182. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2012.07.020>
- Wilmot, K., Wann, J. P., & Brown, J. H. (2006). Problems in the coupling of eye and hand in the sequential movements of children with Developmental Coordination Disorder. *Child: Care, Health and Development*, *32*(6), 665-678. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2214.2006.00678.x>
- Wilson, B. N., Crawford, S. G., Green, D., Roberts, G., Aylott, A., & Kaplan, B. J. (2009). Psychometric properties of the revised Developmental Coordination Disorder Questionnaire. *Physical & Occupational Therapy in Pediatrics*, *29*(2), 182-202. <https://doi.org/10.1080/01942630902784761>
- Wilson, B. N., Kaplan, B. J., Crawford, S. G., Campbell, A., & Dewey, D. (2000). Reliability and validity of a parent questionnaire on childhood motor skills. *The American Journal of Occupational Therapy: Official Publication of the American Occupational Therapy Association*, *54*(5), 484-493. <https://doi.org/10.5014/ajot.54.5.484>
- Wilson, P. H., & Hyde, C. (2013). The development of rapid online control in children aged 6–12 years : Reaching performance. *Human Movement Science*, *32*(5), 1138-1150. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2013.02.008>
- Wilson, P. H., Maruff, P., Butson, M., Williams, J., Lum, J., & Thomas, P. R. (2004). Internal representation of movement in children with developmental coordination disorder : A mental rotation task. *Developmental Medicine and Child Neurology*, *46*(11), 754-759. <https://doi.org/10.1017/s001216220400129x>
- Wilson, P. H., Maruff, P., & Lum, J. (2003). Procedural learning in children with developmental coordination disorder. *Human Movement Science*, *22*(4-5), 515-526. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2003.09.007>

- Wilson, P. H., & McKenzie, B. E. (1998). Information processing deficits associated with developmental coordination disorder : A meta-analysis of research findings. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, 39(6), 829-840.
- Wilson, P. H., Ruddock, S., Smits-Engelsman, B., Polatajko, H., & Blank, R. (2013). Understanding performance deficits in developmental coordination disorder : A meta-analysis of recent research. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 55(3), 217-228. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2012.04436.x>
- Wilson, P. H., Smits-Engelsman, B., Caeyenberghs, K., Steenbergen, B., Sugden, D., Clark, J., Mumford, N., & Blank, R. (2017). Cognitive and neuroimaging findings in developmental coordination disorder : New insights from a systematic review of recent research. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 59(11), 1117-1129. <https://doi.org/10.1111/dmcn.13530>
- Witney, A. G., Wing, A., Thonnard, J.-L., & Smith, A. M. (2004). The cutaneous contribution to adaptive precision grip. *Trends in Neurosciences*, 27(10), 637-643. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2004.08.006>
- Wolpert, D., Ghahramani, Z., & Jordan, M. (1995). An internal model for sensorimotor integration. *Science*, 269(5232), 1880-1882. <https://doi.org/10.1126/science.7569931>
- Wolpert, D. M., Miall, R. C., & Kawato, M. (1998a). Internal models in the cerebellum. *Trends in Cognitive Sciences*, 2(9), 338-347. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(98\)01221-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(98)01221-2)
- Wolpert, D. M., Miall, R. C., & Kawato, M. (1998b). Internal models in the cerebellum. *Trends in Cognitive Sciences*, 2(9), 338-347. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(98\)01221-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(98)01221-2)
- World Medical Association. (2013). World Medical Association Declaration of Helsinki : Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects. *JAMA*, 310(20), 2191-2194. <https://doi.org/10.1001/jama.2013.281053>
- Yao, L., & Peck, C. K. (1997). Saccadic eye movements to visual and auditory targets: *Experimental Brain Research*, 115(1), 25-34. <https://doi.org/10.1007/PL00005682>
- You, H., Shi, J., Huang, F., Wei, Z., Jones, G., Du, W., & Hua, J. (2023). Advances in Genetics and Epigenetics of Developmental Coordination Disorder in Children. *Brain Sciences*, 13(6), 940. <https://doi.org/10.3390/brainsci13060940>
- Zimney, K., Dendinger, G., Engel, M., & Mitzel, J. (2020). Comparison of reliability and efficiency of two modified two-point discrimination tests and two-point estimation tactile

acuity test. *Physiotherapy Theory and Practice*, 1-10.

<https://doi.org/10.1080/09593985.2020.1719563>

Zwicker, J. G., Harris, S. R., & Klassen, A. F. (2013). Quality of life domains affected in children with developmental coordination disorder : A systematic review: Quality of life in DCD. *Child: Care, Health and Development*, 39(4), 562-580. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2214.2012.01379.x>

Zwicker, J. G., Missiuna, C., Harris, S. R., & Boyd, L. A. (2010). Brain Activation of Children With Developmental Coordination Disorder is Different Than Peers. *Pediatrics*, 126(3), e678-e686. <https://doi.org/10.1542/peds.2010-0059>

Zwicker, J. G., Missiuna, C., Harris, S. R., & Boyd, L. A. (2012). Developmental coordination disorder : A review and update. *European Journal of Paediatric Neurology*, 16(6), 573-581. <https://doi.org/10.1016/j.ejpn.2012.05.005>

Zwicker, J. G., Suto, M., Harris, S. R., Vlasakova, N., & Missiuna, C. (2018). Developmental coordination disorder is more than a motor problem : Children describe the impact of daily struggles on their quality of life. *British Journal of Occupational Therapy*, 81(2), 65-73. <https://doi.org/10.1177/030802261773504>