



Pré-étalonnage de deux tests d'Imagerie Motrice : la Tâche Radiale de Fitts et le Test de Jugement de Latéralité Manuelle

De nouveaux futurs outils pour l'évaluation du Trouble Développementale de la Coordination

Mémoire en vue de l'obtention du Diplôme d'État de Psychomotricien

TIREAU Audrey

Juin 2019

Liste des abréviations

- C-VRFT : Tâche d'Ajustement Radial Virtuelle
- DMI : Déficit de Modélisation Interne
- DSST : tâche de saccade en deux temps
- EACD : European Academy for Childhood Disability
- EEG : Electro-EncéphaloGraphie
- IES : Mean Inverse Efficiency
- IM : Imagerie Motrice
- MAND : McCarron Assessment of Neuromuscular Development
- SNA : Système Nerveux Autonome
- SNC : Système Nerveux Central
- RPT : Radial Pointing Task
- TDA/H : Trouble du Déficit de l'Attention avec ou sans Hyperactivité
- TDC : Trouble Développementale de la Coordination
- TJLM : Test de Jugement de Latéralité Manuelle
- TRF : Tâche Radiale de Fitts
- TRS : Temps de Réaction Sériel
- VGPT : Visually Guided Pointing Task

Table des matières

INTRODUCTION.....	- 1 -
PARTIE THEORIQUE.....	3
I. LE TROUBLE DEVELOPPEMENTAL DE LA COORDINATION	- 4 -
1. DEFINITION SELON LES CRITERES DIAGNOSTIC DU DSM-5.....	- 4 -
2. ÉPIDEMIOLOGIE	- 5 -
3. ÉTIOLOGIE	- 5 -
4. COMORBIDITE / CO-OCCURRENCE.....	- 6 -
5. SEMIOLOGIE.....	- 6 -
5.1. <i>Trépied symptomatologique</i>	- 6 -
6. DIAGNOSTIC.....	- 8 -
7. DEFICIT DE MODELISATION INTERNE CHEZ LE TDC	- 8 -
II. L'IMAGERIE MOTRICE.....	- 9 -
1. DEFINITION	- 9 -
2. LES DEUX FORMES D'IMAGERIE MOTRICE	- 9 -
2.1. <i>Visuelle (externe)</i>	- 9 -
2.2. <i>Kinesthésique (interne)</i>	- 10 -
3. L'IMAGERIE MOTRICE, PHENOMENE DE SIMULATION DE L'ACTION	- 10 -
3.1. <i>Les apports neuro-anatomiques</i>	- 10 -
3.2. <i>Les apports de la neurophysiologie</i>	- 11 -
3.3. <i>Les aspects comportementaux</i>	- 12 -
3.4. <i>Perceptif</i>	- 13 -
4. PLASTICITE CEREBRALE ET IMAGERIE MOTRICE	- 14 -
4.1. <i>L'apprentissage procédural</i>	- 14 -
4.1.1. <i>Apprendre par un entraînement d'imagerie motrice</i>	- 14 -
4.1.2. <i>Les modifications neuro-anatomiques à la suite d'une pratique mentale</i>	- 15 -
4.2. <i>Les neurones miroirs</i>	- 16 -
5. DEVELOPPEMENT ET EFFICIENCE DU PROCESSUS D'IMAGERIE MOTRICE.....	- 16 -
5.1. <i>De l'enfant à l'adulte, développement normal</i>	- 16 -
5.1.1. <i>Étude expérimentale de Funk, Brugger & Wilkening (2005)</i>	- 18 -
5.1.2. <i>Étude expérimentale de Caeyenberghs, Tsoupas, Wilson & Smits-Engelsman (2009)</i> -	19 -
5.2. <i>Association avec le développement cérébral</i>	- 20 -
III. IMAGERIE MOTRICE COMME INVESTIGATION DE L'INTEGRITE DES MODELES INTERNES DE L'ACTION.....	- 20 -
1. LA MOTRICITE ORIENTEE VERS UN BUT	- 20 -
2. LE CONTROLE MOTEUR	- 21 -
3. CONCEPT DE MODELE INTERNE	- 22 -

3.1.	<i>Le modèle interne inverse (contrôleur)</i>	- 23 -
3.2.	<i>Le modèle interne direct (prédictif)</i>	- 24 -
3.2.1.	<i>Le modèle dynamique</i>	- 25 -
3.2.2.	<i>Le modèle sensoriel</i>	- 25 -
3.2.3.	<i>L'association des deux modèles internes prédictifs</i>	- 25 -
3.3.	<i>La relation complémentaire des deux modèles</i>	- 26 -
4.	MODELES INTERNES ET IMAGERIE MOTRICE.....	- 26 -
5.	LES PARADIGMES D'IMAGERIE MOTRICE.....	- 28 -
5.1.	<i>Le paradigme de jugement de l'action</i>	- 28 -
5.2.	<i>Le paradigme de chronométrie mental</i>	- 29 -
5.3.	<i>Les précautions à prendre pour manipuler ces deux paradigmes</i>	- 30 -
6.	RESULTATS DES ETUDES EXPERIMENTALES PORTANT SUR L'EVALUATION DE L'IM DANS LE CADRE DU TDC.....	- 30 -
6.1.	<i>Déficit de performance d'utilisation de l'Imagerie motrice</i>	- 31 -
6.2.	<i>Corrélation entre le déficit d'IM et les habiletés motrices chez un enfant porteur de TDC</i>	- 31 -
6.3.	<i>Vérification de la loi de Fitts chez les enfants TDC</i>	- 32 -
6.4.	<i>Déficit de prédiction du premier mouvement oculaire</i>	- 32 -
6.5.	<i>Méta-analyse sur la performance des enfants TDC aux tâches de rotation manuelle (Barhoun et al., 2019)</i>	- 33 -
IV. INTERET ET JUSTIFICATION DE L'ETUDE ET DU MEMOIRE		- 34 -
1.	LES OUTILS ACTUELS.....	- 34 -
1.1.	<i>Le VGPT</i>	- 35 -
1.2.	<i>Le C-VRFT</i>	- 35 -
1.3.	<i>La tâche de chronométrie mentale</i>	- 35 -
2.	INTERET DE L'UTILISATION DES TESTS D'IM.....	- 36 -
3.	JUSTIFICATION DU PROJET.....	- 37 -
3.1.	<i>L'arbre décisionnel</i>	- 37 -
3.2.	<i>Le projet d'étude</i>	- 39 -
PARTIE PRATIQUE		- 40 -
1.	OBJECTIF ET BUT GENERAL DE L'ETUDE.....	- 41 -
2.	RAPPEL QUALITE METRIQUE ET STATISTIQUE.....	- 41 -
3.	LA POPULATION.....	- 42 -
4.	LA PASSATION.....	- 42 -
II. LES DEUX TESTS D'EVALUATION DE LA CAPACITE D'IMAGERIE MOTRICE		- 43 -
1.	LA TACHE RADIALE DE FITTS.....	- 43 -
1.1.	<i>Matériel</i>	- 43 -
1.2.	<i>Procédure</i>	- 44 -
1.3.	<i>Les consignes</i>	- 46 -
2.	LE TEST DE JUGEMENT DE LATERALITE MANUELLE.....	- 47 -

2.1.	<i>Matériel</i>	- 47 -
2.2.	<i>Procédure</i>	- 48 -
2.3.	<i>Les consignes</i>	- 49 -
III. RESULTATS PRELIMINAIRES D'ETALONNAGE DES TESTS D'IMAGERIE MOTRICE		- 50 -
1.	LES VARIABLES RETENUES.....	- 50 -
2.	STATISTIQUE DESCRIPTIF	- 50 -
3.	EFFETS DE L'AGE ET DU SEXE SUR LES DIFFERENTES VARIABLES	- 51 -
3.1.	<i>La Tâche Radiale de Fitts</i>	- 52 -
3.1.1.	<i>Temps de mouvement moyen en condition réelle</i>	- 52 -
3.1.2.	<i>Temps de mouvement moyen en condition simulée (IM)</i>	- 53 -
3.1.3.	<i>Corrélation entre Temps de mouvement moyen en condition réelle et Temps de mouvement en condition simulée (IM)</i>	- 54 -
3.2.	<i>Le Test de Jugement de Latéralité Manuelle</i>	- 55 -
3.2.1.	<i>Temps de réponse moyen</i>	- 55 -
3.2.2.	<i>Nombre de bonnes réponses</i>	- 56 -
3.3.	<i>Corrélation entre performances à la Tâche Radiale de Fitts et du subtest Dextérité Manuelle du M- ABC 2</i>	- 57 -
3.3.1.	<i>Temps de mouvement moyen en condition réelle et Temps de mouvement moyen du subtest Dextérité Manuelle du M- ABC 2</i>	- 57 -
3.3.2.	<i>Temps de mouvement moyen en condition simulée (IM) et Temps de mouvement moyen du subtest Dextérité Manuelle du M- ABC 2</i>	- 58 -
3.4.	<i>Corrélation entre performance au Test de Jugement de Latéralité Manuelle et au subtest Dextérité Manuel du M-ABC 2</i>	- 59 -
3.4.1.	<i>Temps de réponse moyen au Test de Jugement de Latéralité Manuelle et Temps de mouvement moyen du subtest Dextérité Manuelle du M-ABC 2</i>	- 59 -
3.4.2.	<i>Nombre de bonnes réponses au Test de Jugement de Latéralité Manuelle et Temps de mouvement moyen du subtest Dextérité Manuelle du M-ABC 2</i>	- 60 -
4.	TABLEAUX RECAPITULATIFS DES RESULTATS OBTENUS	- 61 -
IV. DISCUSSION		- 63 -
CONCLUSION GENERALE		- 70 -
BIBLIOGRAPHIE		I
ANNEXES		X
ANNEXE 1 : FEUILLE DE NOTATION DE LA TACHE RADIALE DE FITTS		X
ANNEXE 2 : FEUILLE DE NOTATION DU TEST DE JUGEMENT DE LATERALITE MANUELLE		XI

Introduction

Dans le cadre des 20^{es} Journées Toulousaines de la Psychomotricité, puis au sein de ma formation, j'ai découvert le concept de l'imagerie motrice (IM) et son intérêt dans le cadre d'une prise en charge du Trouble Développementale de la Coordination (TDC). Ce trouble est caractérisé par des difficultés dans l'exécution des habiletés motrices, de la lenteur ainsi que de la maladresse. De plus, les enfants TDC peuvent montrer des difficultés à s'imaginer des mouvements.

De ce fait, M. Puyjarinet a décidé d'étalonner deux tests, très souvent utilisés dans le domaine expérimental, qui sont la Tâche Radiale de Fitts et le Test de Jugement de Latéralité Manuelle. Pour que ces deux outils, à terme, puissent être utilisés par des praticiens (psychomotriciens, neuropsychologues, ergothérapeutes, kinésithérapeutes) dans le cadre d'une évaluation des capacités d'imagerie motrice de l'enfant lors d'une suspicion de TDC.

Dans le cadre de mon mémoire, j'ai voulu m'investir et participer à ce projet d'étalonnage car il me semble pertinent de faire évoluer la pratique du psychomotricien, d'élargir ses outils autant d'évaluation que de prise en charge en parallèle des avancées de la science. Le but de ce projet est dans un premier temps de rendre compte de l'utilité et de l'intérêt de ces deux tests dans le cadre de la pratique du psychomotricien puis dans un second temps, de créer un étalonnage français afin d'en faire des outils d'évaluation ; mais aussi de rendre compte de l'efficacité des protocoles de rééducation d'imagerie motrice dans le cas d'un déficit moteur.

Pour effectuer mon étalonnage, j'ai pu me rendre dans une école publique et un club sportif où j'ai fait passer les deux tests d'imagerie motrice à des enfants tout venant âgés de 7 à 11 ans. Cette étape de mon mémoire a été fondamentale pour créer mon échantillonnage. C'est à partir des données récupérées auprès des enfants et de l'analyse de celles-ci, que j'ai essayé de répondre aux questions suivantes : **Est-ce que les deux tests d'imagerie motrice mesurent bien ce qu'ils devraient mesurer ? Observe-t-on des différences de performances entre les enfants d'âges différents ?**

De façon à répondre à ces questions, nous verrons dans la partie théorique quelques généralités sur le TDC puis nous définirons le concept d'imagerie motrice, les mécanismes qu'elle sous-

tend ainsi que son évolution chez l'enfant. Ensuite, nous aborderons la théorie des Modèles internes puis comment l'imagerie motrice peut rendre compte de l'intégrité de ces modèles. Pour illustrer, cette relation, nous décrirons des études de l'IM dans le cadre du TDC. Puis nous montrerons l'intérêt de la présente étude d'étalonnage dans le domaine de la psychomotricité.

Ensuite, dans la partie pratique seront expliqués le protocole de passation et la procédure utilisée. Puis nous exposerons les résultats des analyses effectuées. Enfin, nous terminerons par interpréter les résultats dans la discussion.

Partie Théorique

I. Le Trouble développemental de la coordination

1. Définition selon les critères diagnostic du DSM-5

Le Trouble développemental de la coordination (TDC) est un trouble neurodéveloppemental caractérisé par des difficultés importantes et persistantes dans les activités de la vie quotidienne, dues à des déficits dans l'acquisition et l'exécution d'habiletés motrices coordonnées.

Le TDC a été défini par 4 critères dans le « Manuel Diagnostic et Statistique des troubles mentaux » (DSM-5) :

- 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 (par exemple laisser échapper ou heurter des objets), ainsi que de la lenteur et de l'imprécision dans la réalisation des tâches motrices (par exemple attraper un objet, utiliser des ciseaux ou des couverts, écrire, 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 du sujet (par exemple soins et hygiène personnelle) et ont un impact sur les performances universitaires/ scolaires, 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 (p. ex. une infirmité motrice cérébrale, une dystrophie musculaire, une maladie dégénérative).

2. Épidémiologie

Le trouble développemental de la coordination est un trouble assez fréquent, les pourcentages les plus couramment cités dans la littérature scientifique se trouvent entre 5 et 6%. Mais des chercheurs ont montré que cette prévalence variait selon les pays allant de 4,9% de TDC sévères et 8,6% de TDC modérée chez les enfants suédois (Kadesjo & Gillberg, 1999), 10% des enfants britanniques présenteraient un TDC (Henderson, Rose & Henderson, 1992) et jusqu'à 15,6% chez les enfants singapouriens (Wright, Sugden & Tan, 1994). Il touche plus les garçons que les filles.

Le TDC est un trouble qui a des conséquences sur les tâches de la vie quotidienne. Son impact peut diminuer suite à des prises en charge mais plusieurs études montrent que les difficultés persistent à l'adolescence et à l'âge adulte (Cantell & al, 2003 ; Geuze & Börger, 1993 ; Knuckey & Gubbay, 1983 ; Losse *et al.*, 1991 ; Roussounis *et al.*, 197 ; Visser *et al.*, 1998 in Geuze, 2005). Ces difficultés sont encore plus évidentes lorsqu'une tâche nouvelle leur est présentée.

3. Étiologie

A ce jour, l'étiologie du TDC n'est pas encore connue. Le TDC serait la conséquence de divers facteurs génétiques et environnementaux intriqués. On retrouve en premier lieu, la prématurité comme facteur de risque le plus connu (Foulder-Hughes & Cooke, 2003 in Albaret, 2013). Il existe aussi des facteurs de risque pré-, péri- et néonataux (petit poids de naissance, difficultés respiratoires, score d'Apgar médiocre). Cependant le rôle causal n'a pas été défini car certains enfants présentant les mêmes signes se sont développés normalement par la suite (Pearsall-Jones *et al.*, 2009 in Blais, 2018).

Dans son étude Gubbay (1975) a montré des anomalies EEG (Électro-encéphalographies) non spécifiques chez certains enfants TDC. D'autres anomalies cérébrales non spécifiques (dilatation ventriculaire, atrophie cortical ou démyélinisation) ont été mises en avant par Knuckey *et al.* (1983). On retrouve souvent des facteurs de risques environnementaux comme l'absence de stimulation, une limitation des occasions d'apprentissage, un manque de motivation de l'enfant (Batey *et al.*, 2004 in Blais, 2018). Ensuite au niveau des facteurs de risque génétique, l'étude de Lichtenstein *et al.*, (2010 in Albaret, 2013) a montré que chez 245

paires de jumeaux mono et dizygotes, si l'un est porteur d'un TDC, l'autre a 70% de risque de l'être aussi. Enfin, des anomalies neuro-anatomiques des structures corticales lobaires ou sous-corticales (thalamus, noyaux gris centraux, cervelet) semblent avoir été mise en évidence dans l'origine du TDC (Vaivre Douret *et al.*, 2011).

4. Comorbidité / Co-occurrence

Il est compliqué de parler de comorbidité dans le TDC lorsqu'on fait le lien avec d'autres troubles du développement. Selon plusieurs auteurs les différents troubles retrouvés ne seraient pas indépendants mais ils existeraient dans un continuum et, cet ensemble serait un indice pour comprendre la sévérité du TDC. D'après Kaplan *et al.* (1998), il y aurait une association fréquente TDC, TDA/H (Trouble du déficit de l'Attention avec ou sans Hyperactivité) et dyslexie ; il explique que cet ensemble de troubles proviendrait d'un développement cérébral atypique. Dans le cas du TDA/H, il semble que 50% des enfants diagnostiqués ont des difficultés motrices qui sont compatibles avec un diagnostic de TDC et la relation inverse a aussi été trouvée (Zwicker, MA, Missiuna & Boyd, 2009 in Blais, 2018). D'après O'Hare et Khalid (2002 in Blais, 2018), on constate une incidence élevée de problèmes de lecture, de phonologie et d'écriture dans un groupe de 23 enfants atteints de TDC.

Un enfant porteur de TDC peut à court terme présenter une baisse du sentiment d'efficacité personnelle, une faible estime de soi et un sentiment de mise à l'écart ; il a également plus de risque de développer des troubles psychiatriques de type dépression ou anxiété (Hellgren, Gillberg, Bagenholm & Gillberg, 1994 ; Piek *et al.*, 2008 in Albaret, 2013). Enfin, Cairney *et al.* (2005) montrent que chez les garçons de 9 à 14 ans, le TDC peut être un facteur de risque de surpoids et d'obésité mais que la corrélation n'est pas retrouvée chez les filles.

5. Sémiologie

5.1. Trépied symptomatologique

Le trouble développemental de la coordination est un trouble de la motricité intentionnelle. D'après la définition Albaret 2001 & CEDIFP, on peut le placer parmi les troubles psychomoteurs bien que sa symptomatologie soit très variée et qu'elle dépende du type

d'évaluation utilisée dans chaque étude. Chez les enfants atteints d'un TDC, des altérations ont été mises en évidence dans les systèmes perceptifs et moteurs.

- Au niveau perceptivo-moteurs :

On peut observer chez le sujet TDC des difficultés à estimer la taille des objets (Hulme *et al.*, 1982 in Albaret, 2013), une lenteur et une difficulté d'intégration dans les épreuves visuomotrices, des difficultés à localiser la position d'un objet dans l'espace (Schoemaker *et al.*, 2001 ; Parush, Yochman, Cohen & Gershon, 1998 in Visser, 2003), une diminution de la capacité à diriger l'attention visuelle (Wilson & Maruff, 1999). Ensuite, une faible discrimination proprioceptive et kinesthésique (Laszlo *et al.*, 1988 in Albaret, 2013) et parfois une diminution de l'acuité kinesthésique (Coleman, Piek & Livesey, 1997 ; Laszlo *et al.*, 1988 ; Laszlo *et al.*, 1996 ; Piek, Pitcher & Hey, 1999 ; Smyth & Mason, 1998 in Blais, 2018). Une plus grande variation de régulation dans le timing et la force de contraction musculaire tant dans les tâches rythmiques que discrètes chez les sujets TDC que chez des sujets contrôles (Williams, Woollacott & Yvry, 1992, in Albaret, 2013 ; Lundy-Ekman *et al.*, 1991). Le TDC s'accompagne aussi de perturbation de transfert intermodale (Newham & Mc Kenzie, 1993, in Albaret, 2013), une prise en compte des informations haptiques altérées (Schoemaker *et al.*, 2001, in Albaret, 2013). On observe aussi des temps de réaction et de mouvement allongés et variables selon la complexité de la tâche à effectuer (Albaret, 2013). D'après Larkin & Hoare (1992) et Williams *et al.*, (1985), les coordinations générales sont atypiques avec un manque d'amplitude, une limitation des degrés de liberté des articulations, un enchaînement séquentiel inapproprié des parties du corps concernées par le mouvement. Se repère aussi des troubles de l'équilibre en statique, dynamique et unipodal (Geuze, 2003 & 2005) et des anomalies du contrôle postural avec soit une hypertonie soit une hypotonie (Wann, Mon-Williams & Rushton, 1998 ; Williams & Wollocott, 1997 in Blais, 2018) ainsi que des mouvements choréiformes (Hadders- Algra, 2002).

L'enfant TDC va également présenter des difficultés en motricité fine (Smits-Engelsman, Niemeijer & Van Galen, 2001 in Blais, 2018), les coordinations manuelles sont difficilement réussies quand la complexité ou la contrainte augmente (Volman & Geuze, 1998 ; Castelnau *et al.*, 2007 in Albaret, 2013), cela pourrait être dû à l'immaturité persistante du contrôle distal (Geuze, 2005). Par conséquent l'écriture est souvent altérée allant jusqu'à la dysgraphie (Roseblum & Livneh-Zirinski, 2008 in Albaret, 2013). Il peut aussi y avoir une dyspraxie

idéomotrice et/ ou idéatoire. Pour finir, au niveau des apprentissages moteurs, le sujet TDC va avoir des difficultés lorsqu'il doit anticiper, planifier et automatiser l'apprentissage du mouvement. Il est sensible aux changements (Geuze, 2005).

- Les signes neurologiques doux :

On retrouve une exagération de certains réflexes tendineux (Williams & Burke, 1995 in Albaret, 2013), un déficit graphesthésique, des dysdiadococinésies, des syncinésies (Licari, Larkin & Miyahara, 2006 in Albaret, 2013) et de la lenteur (Losse *et al.*, 1991 in Albaret, 2013). Une dysmétrie (imprécision dans la distance et la direction des mouvements), de l'adiadococinésie (pattern irrégulier dans les mouvements alternés), les syncinésies d'imitation et le tic choréiforme (une forme de tremblement des doigts) (Volman & Geuze, 1998).

- Les troubles affectifs

On retrouve chez les enfants porteurs d'un TDC, une atteinte de l'estime de soi (Dewey *et al.*, 2002 ; Missiuna *et al.*, 2006 ; Piek *et al.*, 2006 in Blais, 2018) avec des refus scolaires et/ ou un évitement de certaines activités dans lesquelles le sujet peut se trouver en grande difficulté. Devant les échecs répétés, l'enfant peut perdre sa motivation (Chen & Cohn, 2003).

6. Diagnostic

Actuellement, le diagnostic de TDC peut être posé à partir de 5 ans car on estime qu'à cet âge le système perceptivo-moteur est considéré comme établi. Si un enfant de 3 ans à 5 ans montre des difficultés motrices marquées et que certaines causes de retards moteurs ont été écartées (syndrome génétique, maladie neurodégénérative) le diagnostic peut être posé. Mais, il nécessite de réaliser au moins deux évaluations à des intervalles de temps assez long (au moins trois mois) d'après les recommandations de l'EACD (European Academy for Childhood Disability, 2012).

7. Déficit de modélisation interne chez le TDC

La réalisation d'un mouvement intentionnel nécessite la mise en jeu d'un ensemble de mécanismes à plusieurs niveaux, cela se joue dans le cerveau. Ces mécanismes permettent la

sélection du mouvement dans le répertoire moteur, sa planification et son contrôle pendant et après son exécution. L'enfant atteint d'un TDC, présenterait une incapacité partielle à se représenter mentalement une action. Il serait en difficulté pour planifier l'action puis pour la réguler et l'ajuster pendant son exécution. Par conséquent, il serait seulement dépendant des feedbacks réafférents visuels (c'est-à-dire après l'exécution du mouvement). Sauf que ces afférences visuelles sont plus lentes à générer et à analyser. Elles ne permettraient donc pas une correction du mouvement en temps réel.

Ce défaut de modélisation anticipée s'exprime lors de l'acquisition des mouvements (création de modèle) mais aussi dans la capacité à modifier des modèles déjà établis et répétés (Magnat *et al.*, 2015).

II. L'imagerie motrice

1. Définition

On doit la première définition de l'imagerie motrice à Ribot (cité par Michotte, Piéron & Duprat, 1912 in Guilbert *et al.*, 2013) « *En termes psychologiques, c'est la reviviscence, spontanée ou provoquée de sensations kinesthésiques simples ou complexes, éprouvée antérieurement. En terme physiologiques, c'est l'excitation des zones corticales (quelles qu'elles soient) où aboutissent les sensations du mouvement. Ces images ne peuvent être que des mouvements qui commencent mais restent internes, sans se réaliser en mouvement objectif* ». Cette définition a été reprise par la suite par plusieurs auteurs mais aucun consensus n'a été trouvé. L'imagerie motrice correspondrait à un état cognitif dynamique qui permet l'accès conscient du déroulement d'une action et de ces caractéristiques temporelles, spatiales, proprioceptives et kinesthésiques à partir d'une perspective égocentrée mais qui n'a pas pour but d'être exécuté (Puyjarinet, 2015). Il s'agit donc ici de simuler une action réelle (Guilbert *et al.*, 2013).

2. Les deux formes d'imagerie motrice

2.1. Visuelle (externe)

Elle repose sur un point de vue perceptif allocentré. Cette forme d'imagerie motrice externe est dite « à la troisième personne », elle se fonde exclusivement sur des données visuelles. C'est

une représentation visuelle par la personne de l'action ou de l'espace où elle se déroule. Les comportements sont classés sous forme de tâches visuelles (Gabbard & Bobbio, 2011).

2.2. Kinesthésique (interne)

Elle est dite à la première personne, c'est une simulation mentale dynamique avec l'idée de ressentir dans son propre corps, toutes les conséquences de l'action. La personne génère une image du soi en action avec toutes les conséquences sensorielles (visuelle, proprioceptive, kinesthésique) qui peuvent être impliquées. Cette forme d'imagerie peut concerner l'ensemble du corps ou l'une de ses parties.

3. L'imagerie motrice, phénomène de simulation de l'action

Jeannerod (2001) émet l'hypothèse que la simulation de l'action fait partie du système sensorimoteur et cognitif de l'individu. Il existerait plusieurs formes de processus d'état mentaux de simulation de l'action qu'il appelle les *états S*. Cette simulation de l'action mentale permet de spécifier les buts de l'action, la planification d'un mouvement, ainsi que son contrôle grâce à une prédiction du mouvement par rapport à l'état initial et l'état souhaité tout en prenant en compte les contraintes de l'environnement. Tout cela donne lieu à une représentation de l'action et cette dernière peut être exécutée ou non.

Ainsi, l'imagerie motrice serait un *état S*, inscrit dans le corps du sujet et pour lequel un accès conscient est possible. Différentes preuves décrites ci-dessous renforcent cette idée d'un *continuum fonctionnel* entre action exécutée et action imaginée, qui reposerait sur l'identité des structures neuronales impliquées dans l'état cognitif, qui permet une action simulée, et dans l'état cognitif qui précède la réalisation d'une action (Jeannerod, 2001). De même de nombreux autres travaux issus de divers domaines comme les sciences cognitives, neurophysiologiques, comportementales, ont vu le jour pour confirmer cette hypothèse et ont contribué à une meilleure compréhension de ce phénomène d'imagerie motrice.

3.1. Les apports neuro-anatomiques

Le processus d'imagerie motrice montre l'activation d'aires cérébrales communes à des paramètres permettant le mouvement réel. D'après plusieurs études à partir de technique

d'imagerie médicale, le cortex pariétal et le cervelet sont activés en IM et qui sont normalement engagés dans la programmation et l'exécution motrice (Naito *et al.*, 2002 in Lebon *et al.*, 2013) ; mais aussi le cortex prémoteur, l'aire motrice supplémentaire, le gyrus moteur précentral et cingulaire qui sont connus pour participer aux stades préparatoires de l'action (Decety, 1996, in Lebon *et al.*, 2013). Selon Jeannerod (2006), le cortex moteur est impliqué dans la genèse des représentations motrices et, plus précisément dans le contrôle et la planification motrice, il interagit en permanence avec d'autres structures cérébrales.

Lorsqu'il y a simulation d'un mouvement, les intentions motrices seraient formulées au sein du cortex prémoteur et projetées dans le cortex pariétal ; puis des résultats partiels de la simulation sont projetées en retour au cortex prémoteur. De son côté, l'aire sensorielle primaire s'activerait durant l'IM pour donner une prédiction des afférences sensorielles du mouvement non exécuté. Ces données sensorielles vont ensuite permettre d'actualiser les plans moteurs venant du cortex prémoteur.

Ensuite, l'hypothèse qui permet de dire que le mouvement en imagerie est seulement simulé, vient de la découverte de l'existence d'une voie inhibitrice directe entre le cortex pariétal inférieur droit et le cortex moteur primaire (Lebon, Lotze, Stinear & Byblow, 2012). L'inhibition inter-hémisphérique permettrait les activations des aires frontales, pariétales et cérébelleuses pour former une copie d'efférence sans que la commande motrice ne soit envoyée aux effecteurs périphériques (muscles impliqués). Ainsi, certaines zones neuronales seraient les mêmes dans le processus d'action simulée comme l'imagerie motrice et dans le paramétrage avant la réalisation de l'action réelle.

3.2. Les apports de la neurophysiologie

Il existe des modifications venant du système nerveux autonome (SNA) qui seraient similaires dans le mouvement réel ou imaginé. Lors de la planification et la programmation d'une commande motrice, en parallèle le système végétatif règle son paramétrage énergétique en mobilisant les ressources de l'organisme par anticipation, nous pouvons déjà enregistrer des variations végétatives sans qu'aucun mouvement ne soit encore réalisé.

D'autres travaux viennent prouver l'hypothèse émise par Jeannerod (1994, 2001, 2003 in Guilbert *et al.*, 2013). Lors d'un exercice mentalement simulé, on a pu observer une élévation

du rythme cardiaque et la ventilation respiratoire. Ces modifications varient selon l'intensité de l'effort physique imaginé (Decety, Jeannerod, Germain & Pastene, 1991 ; Decety, Jeannerod, Durozard & Baverel, 1993 ; Gandevia, Allen & McKenzie, 1995 ; Wuyam *et al.*, 1995 ; in Lebon *et al.*, 2013). Collet *et al.*, (2013) dans leur étude sur le sport de tir, ont mesuré l'activité du système nerveux végétatif lors de la phase de concentration et pendant l'exécution. Ils se sont aperçus que pendant la phase de concentration, le tireur faisait un rappel mental des actions à produire (placement des appuis, fixation du bassin, élévation et stabilisation du bras porteur de l'arme et appui sur la gâchette) et les réponses végétatives étaient comparables à celles enregistrées pendant l'action elle-même. Cette expérience a aussi permis de montrer que l'activité du SNA peut se révéler être un indice sur la qualité de l'imagerie motrice. Plus le tir était précis, plus les réponses végétatives enregistrées durant la concentration et l'exécution étaient similaires (Deschaumes-Molinario, Dittmar & Vernet-Maury, 1991 in Guillot & Collet, 2008).

Enfin sur la base d'enregistrements psychophysiologiques, comportementaux et psychologiques, Collet, Guillot, Lebon, MacIntyre & Moran (2011 in Collet *et al.*, 2013) postulent que plus une personne est performante dans un travail de simulation mentale, plus elle présentera des réponses végétatives presque identiques à celle retrouvées pendant l'exécution réelle et très éloignées de celles en activité de repos. Mais l'amplitude des variations reste néanmoins plus faible lors de la représentation mentale (Decety *et al.*, 1993 ; Bolliet *et al.*, 2005 in Collet *et al.*, 2013).

Par ailleurs, au niveau du système périphérique des études ont montré qu'il existerait une contraction subliminale des muscles concernés suite à l'inhibition partielle de la commande motrice. Cette activité est variable selon l'intensité de l'image mentale (Lebon *et al.*, 2013) mais elle n'est pas suffisante pour pouvoir provoquer la contraction musculaire volontaire.

3.3. Les aspects comportementaux

L'exécution d'un mouvement en IM n'est pas directement observable, c'est l'une des raisons qui permet de dire que c'est une simulation mentale de l'action. Cet argument a été testé en comparant les propriétés temporelles et biomécaniques entre une tâche effectuée en IM ou en réelle.

Guilbert *et al.*, (2013) ont montré qu'il fallait autant de temps à un individu pour atteindre une cible en marchant réellement qu'en s'imaginant l'atteindre. Ce constat a permis de dire que les actions imaginées respectent les mêmes caractéristiques temporelles que les actions correspondantes exécutées, on appelle ce phénomène l'invariance temporelle.

De plus la loi de Fitts (1994) rend compte que le temps d'exécution d'un mouvement réel est corrélé à la difficulté de tâche, cette loi est aussi conservée lors de la simulation d'une tâche motrice. Maruff *et al.*, (1999) montrent qu'en utilisant des tâches de pointage visuo-manuel, le mouvement imaginé respecte cette loi de Fitts et ils montrent également que la durée de production de la tâche dépend de l'asymétrie manuelle. La durée d'exécution en imagination sera supérieure quand on demandera à l'individu de le faire avec la main non-dominante plutôt qu'avec la main dominante.

Donc les auteurs soutiennent que les mêmes contraintes physiques et environnementales influencent les mouvements réels et imaginaires.

Plusieurs études ont montré qu'un entraînement, en IM, d'une tâche peut avoir des conséquences sur son exécution réelle, on a observé une amélioration de la performance, une augmentation de la vitesse d'exécution, un gain de force musculaire significatif. D'après Enoka (1997 in Lebon *et al.*, 2013), ces changements pourraient être attribués à une modification neuronale de la commande motrice. Lors de l'entraînement en IM, la simulation du mouvement permet d'améliorer le processus de prédiction moteur pour en améliorer son contrôle.

3.4. Perceptif

L'IM semble s'associer directement à ce processus prédictif en établissant des paramètres proactifs pour les mouvements en préparation, codés spatialement mais également en termes kinesthésiques avec les paramètres de force et de déroulement temporel pris en compte (Wilson *et al.*, 2001)

La simulation mentale s'accompagne de mouvements oculaires comparables à ceux recueillis durant la perception (Laeng & Teodorescu, 2002 ; Rodionov, Zislin & Elidan, 2004 in Guillot *et al.*, 2010) puis Heremans, Helsen & Feys (2008, in Collet *et al.*, 2013) ont aussi confirmé une similitude des mouvements oculaires pendant la simulation mentale d'un mouvement et

son exécution réelle. Dans ces deux conditions, la vision anticipe la position de la main, pour faciliter la prise d'objet.

4. Plasticité cérébrale et imagerie motrice

La plasticité cérébrale qui consiste à une réorganisation neuronale, a lieu lors de privation d'information sensorielle (par exemple lors d'une amputation) mais aussi lorsqu'un individu se retrouve devant une augmentation d'informations sensorielles. La plasticité cérébrale est liée à l'apprentissage moteur (procédural), elle utilise les informations entrantes, l'entraînement. Le phénomène de plasticité cérébral s'observe par l'imagerie médicale. Elle est prouvée par l'observation de modifications dans le cerveau (Mulder, 2007).

4.1. L'apprentissage procédural

L'apprentissage procédural est un ensemble de processus qui permet l'adaptation de l'individu à son environnement. Il est associé à l'expérience ou à l'exercice et il conduit à des modifications relativement permanentes du comportement (Cohen & Squire, 1980 in Blais, 2018). Un apprentissage entraîne une modification au niveau du système central nerveux et la création d'une trace mnésique capable de soutenir des performances accrues et habiles (Schmidt & Lee, 2005 in Blais, 2018)

4.1.1. Apprendre par un entraînement d'imagerie motrice

Chambaron *et al.*, (2010) ont cherché à savoir si l'imagerie motrice peut amener à l'apprentissage d'un mouvement de la même façon que s'il était appris grâce à la pratique réelle. Dans leur étude, ils ont réparti aléatoirement les participants dans quatre conditions qui sont la « Pratique Physique », « l'Imagerie Motrice », « l'Imagerie Visuelle » et « l'Observation ». Les participants étaient soumis à une tâche de TRS modifiée (Temps de Réaction Sériel). L'expérience se divisait en 3 phases avec une phase d'apprentissage, un test de reconnaissance et un questionnaire d'imagerie (Lorant & Nicolas, 2004) rempli uniquement par les participants de la condition d'imagerie du mouvement.

Les résultats montrent que les participants des conditions « pratique physique », « IM » et « observation » ont appris la séquence mais aucun type d'apprentissage ne semble plus efficace qu'un autre car les performances relevées dans les trois conditions sont similaires.

Donc, cette étude permet de conclure sur le fait qu'un entraînement mental peut permettre l'apprentissage d'une séquence motrice complexe. En effet, il semble exister un chevauchement partiel de réseaux neuronaux pour l'IM et l'observance de l'action. (Vogt *et al.*, 2013). Ce réseau commun implique des régions pariétales et prémotrices postérieures avec des différences mineures entre les deux pratiques (Cross *et al.*, 2009 in Vogt *et al.*, 2013). Cependant, cette étude ne permet pas de dire si l'observation n'a pas été la composante principale de l'apprentissage de la séquence. Car, dans le cas d'un apprentissage mettant en jeu l'observation d'une action motrice puis son acquisition grâce à l'IM, nous ne pouvons pas affirmer que l'observation ne soit pas l'élément principal qui a permis l'apprentissage de la séquence. Le processus d'imagerie motrice seul est difficile à observer dans cette situation (Vogt *et al.*, 2013).

Bien qu'il reste encore des interrogations sur le processus d'IM dans l'apprentissage moteur, plusieurs études basées sur l'IM dans ce cadre montrent des similitudes de résultats entre la pratique réelle et la pratique imagée (Chambaron *et al.*, 2010 ; Lacourse *et al.*, 2004). De plus, Ramsey *et al.*, (2010 in Vogt *et al.*, 2013) ont prouvé qu'imaginer une action différente de l'action à exécuter interférait négativement avec l'exécution motrice.

Par ailleurs, plusieurs auteurs ont montré que le processus d'IM améliorerait la performance motrice, l'apprentissage du mouvement et la mémoire procédurale. Toutefois son effet reste moindre par rapport à la pratique réelle (Feltz & Landers, 1983 ; Hall & Martin, 1999). Dans le domaine du sport, l'IM est aussi utilisée pour améliorer l'apprentissage moteur et maintenir un niveau de performance (Feltz & Landers, 1983, Guillot & Collet, 2008 ; Jackson, Lafleur, Malouin, Richards & Doyon, 2001).

4.1.2. Les modifications neuro-anatomiques à la suite d'une pratique mentale

Les méthodes de neuro-imagerie cérébrale rendent compte de la plasticité cérébrale induite par le travail mental. Ainsi, des auteurs ont prouvé qu'un entraînement mental intensif induit les mêmes modifications dans le système moteur que la pratique physique réelle (Jackson, Lafleur, Malouin, Richard & Doyon, 2001). Ces changements dynamiques ont eu lieu dans le cortex

prémoteur, dans le cortex pariétal et dans le cervelet. Ils sont associés à une augmentation de l'activation des noyaux gris centraux et du cortex préfrontal.

Conclusions :

- On observe des résultats similaires de performance suite à une pratique réelle ou une pratique imaginée dans le cadre d'un apprentissage moteur ;
- Dans le domaine du sport, l'IM a montré son efficacité pour améliorer la performance et la maintenir ;
- On observe une congruence d'activation du système moteur cortical et sous-cortical dans les deux conditions ;
- L'interférence observée lorsqu'une personne effectue une tâche en IM et une autre tâche réellement apporte une preuve de l'activation concomitante de mêmes processus.

Donc, l'imagerie motrice peut être une technique utilisée pour acquérir ou améliorer des compétences motrices. Cependant, dans le cas d'une pratique d'observation et d'IM, le rôle de chaque processus est encore flou.

4.2. Les neurones miroirs

Les neurones miroirs ont été découverts récemment, plusieurs études ont montré leur implication dans les fonctions d'imitation, d'apprentissage, d'observation, de communication gestuelles et dans l'appréhension des réactions émotionnelles d'autrui. Ils seraient localisés chez l'Homme dans le cortex pariétal inférieur et dans l'aire de Broca (Mathon, 2013). Il semble qu'ils interviennent aussi dans le processus d'IM et qu'ils sont responsables de la formation des représentations internes des mouvements (Puyjarinet, 2015).

5. Développement et efficacité du processus d'imagerie motrice

5.1. De l'enfant à l'adulte, développement normal

De la naissance et tout au long de la vie, le système cérébral se développe par l'interaction de nombreux phénomènes additifs, soustractifs et de réorganisation en lien avec l'environnement

et les expériences. Certains processus cérébraux ne peuvent apparaître que tard dans l'enfance quand certaines structures corticales deviennent matures, ensuite ils se précisent au fil du temps.

La capacité d'imagerie motrice est un mécanisme qui a été beaucoup décrit chez l'adulte grâce au paradigme de chronométrie mentale et grâce à la loi de Fitts mais il n'a été que rarement investi chez l'enfant. La capacité d'IM n'est pas présente à la naissance, elle apparaît lors de l'enfance et évolue avec le développement du système perceptivo-moteur, des processus de maturations cérébrales et la connaissance du schéma corporel. Dans la littérature, plusieurs auteurs se sont penchés sur l'étude de l'âge d'apparition de ces capacités.

Piaget (Piaget & Inhelder, 1966 in Guilbert *et al.*, 2013) parlait d'imagerie mentale pour faire référence à l'IM, il considérait qu'elle apparaissait vers l'âge de deux ans et qu'elle faisait suite à la fin de la mise en place du système sensorimoteur. Puis, que la maturation de l'imagerie motrice se finissait vers 6 ans. A partir de là, la manipulation mentale des objets et des événements devenait libre de toutes activités motrices réelles.

D'après plusieurs études plus récentes, il semble exister 3 grandes phases de développement du processus d'IM.

La première correspond à son émergence vers 5 - 7 ans mais elle est encore dépendante de l'activité sensori-motrice de l'enfant. Molina *et al.*, (2008) - qui ont utilisé le paradigme de chronométrie mentale en condition de contrôle et en condition d'information chez des enfants de 5 à 7 ans - ont montré qu'il n'y avait pas encore de corrélation significative chez l'enfant de 5 ans entre le mouvement réel et le mouvement imaginé dans les deux conditions. Les capacités d'IM sont émergentes mais elles ne sont pas disponibles pour tous les enfants du fait de l'absence de modèles internes du mouvement.

Ce n'est que vers 7 ans que l'enfant peut accéder à l'imagerie motrice et uniquement lorsqu'il est contraint de simuler les conditions proprioceptives de ses actions. Ce constat peut être lié à l'existence d'une période charnière entre 7 et 10 ans au cours de laquelle les enfants deviennent capable d'utiliser un contrôle prédictif du mouvement (Cordova & Gabbard, 2011 ; Hay, Bard, Ferrel, Olivier, & Fleury, 2005 ; Hay, Bard, Fleury, & Teasdale, 1991 ; Smits-Engelsman & Duysens, 2008 ; Von Hofsten, 2004 ; Westenberg, Smits-Engelsman, & Duysens, 2004 in

Guilbert *et al.*, 2013). A partir de 8 ans, l'enfant peut donc commencer à anticiper les mouvements et se détacher des informations perceptives immédiates.

La seconde phase s'étend jusqu'à l'âge de 9 – 10 ans, elle est caractéristique de la capacité des enfants à intégrer, dans la simulation de l'action, les contraintes externes liées à la tâche. Ainsi à 9 ans, les enfants deviennent capables de simuler des mouvements qui respectent la loi de Fitts (Cayenberghs *et al.*, 2009). L'enfant passe d'un contrôle proactif et rétroactif à un contrôle prédictif et il peut intégrer les contraintes d'une tâche.

Enfin, les capacités d'imagerie motrice continuent à se développer au cours de l'adolescence. Cette période est marquée par de grands changements morphologiques et par d'importants réaménagements des référentiels posturaux dont on peut penser qu'ils entraînent une profonde modification des modèles internes de l'action chez le jeune adulte.

De plus, il est fortement probable que la capacité d'IM évolue avec le développement des habiletés motrices chez l'enfant.

5.1.1. Étude expérimentale de Funk, Brugger & Wilkening (2005)

Il est possible de dire que l'IM a une trajectoire développementale fortement dépendante de l'activité motrice réelle de l'enfant (Funk, Brugger & Wilkening, 2005). Dans leur étude réalisée chez des enfants de 5 et 6 ans, ils ont utilisé le paradigme de jugement de latéralité manuelle. Les enfants devaient déterminer si les mains photographiées, qui étaient présentées soit en position palmaire soit en position dorsale, étaient des mains droites ou gauches. Pour donner leurs réponses, les enfants devaient effectuer la tâche avec les mains soit en position palmaire en appuyant sur un boîtier vers le haut, soit en position dorsale avec la paume qui appuyait sur le boîtier vers le bas. Leurs mains étaient recouvertes d'un tissu.

Seulement 60% des enfants ont réussi la tâche. Les résultats montrent que les enfants ont eu recours, implicitement, à l'IM afin de donner leurs réponses et qu'il y a eu un phénomène de congruence posturale. En effet, les enfants répondaient plus vite lorsque leurs mains étaient dans la même position que celles des mains présentées. Ce constat souligne la corrélation existante entre l'activité motrice de l'enfant et l'activation du processus d'IM. Cependant, on

peut aussi en déduire que l'IM n'est pas nécessairement accessible à tous les enfants de 5 à 6 ans.

5.1.2. Étude expérimentale de Caeyenberghs, Tsoupas, Wilson & Smits-Engelsman (2009)

Caeyenberghs, Tsoupas, Wilson & Smits-Engelsman (2009) ont cherché à savoir, s'il existe un lien entre l'IM, l'imagerie visuelle et les habiletés motrices chez des enfants de 7 à 12 ans. Pour cela, les enfants ont été soumis à la Radial Pointing Task (RPT) qui est une épreuve où l'enfant doit venir faire des va-et-vient entre un cercle central et des rectangles situés tout autour de ce cercle. Cette tâche fait appel à la loi de Fitts. Puis à une tâche de jugement de latéralité, il était explicitement demandé aux enfants d'imaginer tourner leurs propres mains afin de les faire correspondre à la position de celle de la photographie. Les enfants ne devaient pas effectuer de mouvement réel.

Concernant les capacités motrices elles étaient évaluées à l'aide du *McCarron Assessment of Neuromuscular Development* (MAND).

Pour les résultats des deux tâches d'IM, on observe une progression développementale, c'est-à-dire que les capacités d'IM relevées chez les enfants âgés de 7 ans sont significativement inférieures à celles observées chez les enfants plus âgés. Les auteurs soulignent aussi un remaniement important observable vers 9 - 10 ans. En effet, dans la tâche de pointage, on remarque que la durée d'exécution réelle varie en fonction de l'indice de difficulté de la tâche. Plus la tâche est complexe, plus le temps nécessaire à sa réalisation augmente.

En condition réelle, ce constat est observé pour tous les enfants et pour tous les âges mais en condition imaginée, cette relation entre indice de difficulté et durée de pointage n'est constatée qu'à partir de l'âge de 9 ans. On peut conclure, en disant que la loi de Fitts est vérifiée en condition réelle dès l'âge de 7 ans et seulement à partir de 9 ans pour des mouvements imaginés.

Pour conclure, la relation entre imagerie motrice et habileté motrice se renforce avec l'âge. Il est aussi relevé que les corrélations entre les durées de pointage réel et les durées de pointage imaginé augmentent significativement entre 7 et 12 ans.

5.2. Association avec le développement cérébral

La capacité de se représenter l'action suit le développement du cortex pariétal et du cortex préfrontal (Gabbard & Bobbio, 2011). Ce phénomène devient ensuite efficient vers l'âge de 10 ans et il se traduit par des prédictions motrices de plus en plus fines chez l'enfant. Par contre, il ne faut pas oublier que d'autres facteurs peuvent entrer en jeu comme l'attention, les capacités de compréhension des consignes et donc influencer les performances d'IM de l'enfant.

Conclusion de l'évolution du processus d'IM de l'enfance à l'âge adulte

- C'est à partir de 7 ans que l'enfant commence à avoir accès à l'IM puis vers 9 – 10 ans, il peut simuler une action, respectant la loi de Fitts, en lien avec le passage d'une période charnière de remaniement que plusieurs auteurs ont soulevée. Pour finir, la capacité d'IM se précise à l'adolescence et chez le jeune adulte suite à une modification du corps.

L'IM se développe aussi en lien :

- Avec le système perceptivo-moteur qui est montré par le passage d'un contrôle proactif et rétroactif à un contrôle prédictif ;
- Avec le développement des habiletés motrices de l'enfant ;
- Avec la maturation au niveau cérébral du cortex pariétal et préfrontal.

III. Imagerie motrice comme investigation de l'intégrité des modèles internes de l'action

1. La motricité orientée vers un but

La motricité d'un individu n'est pas seulement une réponse à de simples réactions déclenchées par des stimuli extérieurs, elle s'opère selon un but à atteindre qui peut être inconscient ou conscient. Puis, elle peut être modifiée selon la motivation de la personne et selon le contexte environnemental dans lequel se déroule l'action. Ce type de motricité intentionnelle nécessite donc que l'organisme soit en mesure de se représenter l'état actuel de son fonctionnement et

l'état futur qu'il atteindra une fois que l'action aura été exécutée. (Guilbert *et al.*, 2013). Cet ensemble de phénomène est possible grâce au contrôle moteur.

Mais la réciproque n'est pas vraie car toute activité motrice simulée n'aboutit pas nécessairement à son exécution.

La théorie des modèles internes est un modèle explicatif du contrôle moteur. C'est une approche issue des neurosciences cognitives et computationnelles, elle part de l'idée que le cerveau traite l'information de façon séquentielle et non linéaire (l'information passe par un module qui la transforme un peu puis la passe à un second module qui fait de même, etc.). Le traitement permet de développer une motricité adaptée au contexte ainsi qu'aux objectifs et aux besoins particuliers de l'action. Ce modèle permet aussi de préciser les relations entre les entrées sensorielles et la sortie motrice dans la production du mouvement (Lebon *et al.*, 2013).

2. Le contrôle moteur

Le contrôle moteur peut se définir par l'interaction permanente d'un sujet avec son environnement sur lequel il agit involontairement ou volontairement. Il repose sur des réseaux parallèles ou distribués et prend en compte un certain nombre d'informations liées aux propriétés neurophysiologiques, biomécaniques du corps et à l'environnement. C'est un processus beaucoup plus hétérarchique, basé sur l'interaction continue des processus moteurs avec les processus cognitifs et perceptuels (Decety & Greteyez, 2006 in Mulder, 2007).

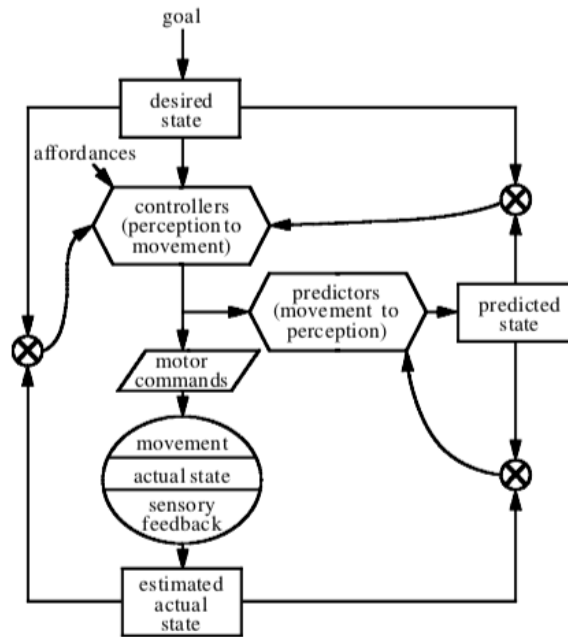


Figure 1: Modèle simplifié des composants de base d'un système de contrôle moteur (Frith, Blakemore & Wolpert, 2000)

La commande motrice vient des systèmes de contrôle du SNC. De cette commande motrice générée, provient une copie d'efférence qui va produire une modélisation anticipée du mouvement identique à celle transmise à l'effecteur moteur. Ce modèle anticipé génère une représentation de l'état futur du système et les conséquences sensorielles proactives du mouvement. Elles sont comparées aux données sensorielles rétroactives (venant de l'interaction du système musculo-squelettique avec l'environnement), pour voir s'il n'y a pas d'erreur de performance (la différence entre l'état souhaité et l'état réel reflète les performances du module actuellement actif et donc son adéquation à l'environnement actuel). La copie d'efférence est donc un processus qui génère un modèle proactif de l'action en préparation, sous forme cinétique et biomécanique en fonction de l'environnement. Mais avant tous ces événements, les configurations des parties du corps doivent être connues (angle des articulations, vitesse angulaire), elles permettent aussi de déterminer le comportement futur du système (Frith, Blakemore & Wolpert, 2000).

3. Concept de modèle interne

Le cadre théorique de ce concept regroupe plusieurs aspects du contrôle moteur humain, de la planification au contrôle en ligne, tout en abordant l'apprentissage des processus mis en jeu. A chaque mouvement, le système nerveux central (SNC) doit s'adapter en permanence afin de

produire une réponse motrice correspondant aux buts et attentes du mouvement et en prenant en compte l'environnement changeant. Pour cela, le SNC dispose de représentations simplifiées de l'état du système sensori-moteur actuel, permettant de prédire ses états futurs et les contrôler. L'apprentissage sert à développer ses représentations, ensuite le SNC peut les utiliser comme modèle comparatif (Lebon *et al.*, 2013).

D'après Lebon *et al.*, (2013), le terme « modèle » signifie que le cerveau modélise l'interaction des systèmes sensoriels et moteurs entre eux ainsi que leur interaction avec le monde physique. On s'intéresse au lien entre les entrées sensorielles et la sortie motrice lors de la production du mouvement. Le terme « interne » signifie que ce modèle est intériorisé par le cerveau et implémenté au sein de circuits neuronaux spécifiques. Ainsi, Wolpert et Ghahramani (2000) définissent ce concept comme un ensemble de connaissances implicites des caractéristiques physiques du corps (cinématique, musculaire), du monde extérieur et de leur interaction. Au sein de ce concept, on peut différencier deux types de modèles : un qui serait prédictif et l'autre contrôleur.

3.1. Le modèle interne inverse (contrôleur)

Le modèle inverse produit des commandes motrices qui sont prédites grâce aux conséquences sensorielles désirées et à l'état courant du système. Il calcule les entrées à partir des sorties, l'entrée étant les commandes neuronales et les sorties du système, les conséquences sensorielles attendues. La relation causale est donc inversée entre la commande motrice et le mouvement.

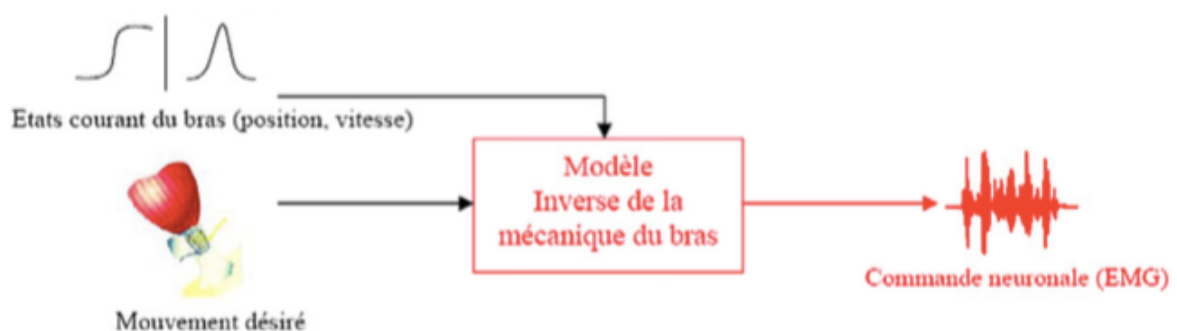


Figure 2 : schématisation du modèle interne inverse (contrôleur) de la dynamique du bras (Lebon, Gueugneau, Papaxanthis, 2013)

La paramétrisation se fait à partir d'affordances visuelles, d'informations proprioceptives et extéroceptives sur l'état actuel de l'individu, de son environnement et à partir des prédictions de l'état futur du système après le mouvement. La comparaison entre les deux étapes permet d'élaborer la commande motrice. Ensuite lors de l'exécution, il y a un retour permanent d'information qui permet au contrôleur d'ajuster le mouvement pour qu'il atteigne son but.

La mise en évidence comportementale de ce modèle a été montrée grâce aux études sur le mouvement de pointage du bras dans un environnement mécanique altéré, par exemple : le bras robotique (Shadmehr & Mussa-Ivaldi, in Lebon *et al.*, 2013). Les sujets réalisant un mouvement du bras dans le nouveau champ de force, montrent des trajectoires distordues et des erreurs spatiales élevées en comparaison avec leur résultat sans force perturbatrice. Suite à plusieurs essais dans le nouvel environnement, les résultats s'améliorent. Ensuite lorsqu'ils reviennent à un environnement normal, on observe un phénomène « effet-miroir » à la force appliquée précédemment. Cette expérience montre l'utilisation du modèle inverse de la dynamique du bras et l'adaptation aux changements de l'environnement (Lebon *et al.*, 2013).

3.2. Le modèle interne direct (prédictif)

Ce modèle fait le lien entre l'action et les conséquences sensorielles et dynamiques. Il consiste à effectuer une simulation interne de la dynamique du processus, en parallèle avec le processus réel. Il utilise une copie d'efférence (copie de la commande motrice) pour prédire l'état futur de l'organe effecteur et, ainsi, les conséquences sensori-dynamiques attendues du mouvement intentionnel (Blakemore, Frith & Wolpert, 2001, in Lebon *et al.*, 2013). La position du membre attendue peut être comparée avec l'état final souhaité et la commande motrice peut être mise à jour (Haggard, 2001, in Lebon *et al.*, 2013), ceci avant que la commande motrice n'atteigne le membre effecteur cible.

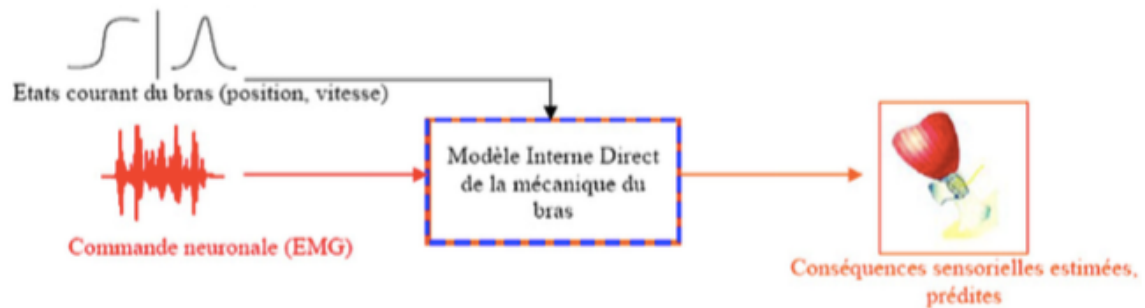


Figure 3 : schématisation du modèle interne direct (prédicatif) de la dynamique du bras (Lebon, Gueugneau, Papaxanthis, 2013)

3.2.1. Le modèle dynamique

Il permet de prédire les paramètres de position et de vitesse de l'état futur en fonction de l'état actuel du système et de la commande motrice, également appelée copie d'efférence (Lebon *et al.* 2013).

3.2.2. Le modèle sensoriel

A partir de l'état estimé, ce modèle permet de calculer la sortie sensorielle estimée correspondante. Il reçoit comme information l'état futur fourni par le modèle prédictif dynamique et prédit les sensations correspondantes à cet état (Lebon *et al.*, 2013).

3.2.3. L'association des deux modèles internes prédictifs

L'association des modèles internes prédictifs sensoriel et dynamique fonctionne en interaction, c'est-à-dire que le modèle prédictif sensoriel permet, à partir de l'état estimé, de calculer la sortie sensorielle estimée correspondante. Il reçoit comme information l'état futur fourni par le modèle prédictif dynamique et prévoit les sensations correspondantes à cet état.

Leur mise en évidence peut s'observer lors de la manipulation manuelle d'objet. Si on prend une pince pouce-index, la force exercée est contrôlée de telle manière qu'elle surpasse légèrement la masse de l'objet. Cette force anticipée ne se modifie pas lors du déplacement de l'objet. Ainsi, le déphasage observé dans l'ajustement de la pince manuelle exprimé en fonction de la force de charge est quasiment nul (Flanagan & Wing, 1995, 1997 ; Augurelle, Penta, White & Thonnard, 2003 in Lebon *et al.*, 2013). Ce modèle prédit une estimation de la force de

préhension nécessaire pour produire une commande motrice en fonction des états futurs de l'objet.

3.3. La relation complémentaire des deux modèles

Les modèles inverse et prédictif réalisent des opérations différentes mais complémentaires. Lors d'un mouvement, le modèle inverse génère une commande motrice en fonction de l'état du système et du but à atteindre. Le modèle prédictif, en parallèle, produira une copie d'efférence en comparant les états et les sorties du système sensori-moteur. Cette relation apparaît dans le cadre de l'apprentissage moteur, car le modèle interne direct est important en premier lieu, pour l'apprentissage d'un nouveau geste, ou plus généralement pour les adaptations sensori-motrices. Il entraîne ensuite un modèle interne inverse afin d'obtenir un contrôle adéquat du système à piloter (Lebon *et al.*, 2013).

En effet, suite à une étude utilisant la manipulation d'un objet durant laquelle le mouvement du bras des sujets était soumis à des perturbations. Johansson & Wolpert (2003 in Puyjarinet, 2015) ont émis l'hypothèse que les sujets apprenaient d'abord à prédire les conséquences de leurs actions, avant d'apprendre à contrôler leurs actions elles-mêmes. Ce dernier résultat renvoie ainsi à l'idée qu'un modèle interne direct pourrait être utilisé dans le cadre de l'apprentissage, en entraînant un modèle interne inverse afin d'obtenir un contrôle adéquat du système à piloter.

4. Modèles internes et imagerie motrice

Dans le cas de l'action imaginée, les modèles internes de l'action seraient donc utilisés pour construire une simulation des commandes motrices et des signaux réafférents générés par l'action, si celle-ci était réellement exécutée. La simulation de l'action impliquerait une comparaison des signaux issus des commandes centrales du mouvement simulé, avec les réafférences simulées. La représentation de l'action imaginée se trouve donc complètement sous tendue par un mécanisme de simulation de l'action, qui est une composante de la planification et de la préparation de l'action comme l'a, maintes fois, souligné Jeannerod (1994, 2001). Cette relation étroite entre modèles internes de l'action et imagerie motrice, a amené certains auteurs à supposer que l'imagerie motrice ne refléterait que la seule capacité des sujets à générer des modèles internes du contrôle moteur, mais qui n'a pas vocation à être exécuté (Crammond, 1997 ; Skoura, Papaxanthis, Vinter, & Pozzo, 2005, in Guilbert *et al.*, 2013).

L'isochronie observée entre les mouvements exécutés et les mouvements mentalement simulés est un premier exemple attestant de l'utilisation d'un modèle interne inverse et prédictif pendant l'imagerie motrice (Lebon *et al.*, 2013). Lorsque les sujets exécutent un mouvement réel ou imaginé, les différents modèles s'activent pour générer les commandes motrices appropriées et produire un modèle proactif des conséquences sensorielles et dynamiques. Au cours, de l'IM on peut en déduire que les mêmes mécanismes entrent en jeu avec la production d'une commande motrice sauf que la commande générée est inhibée, probablement au niveau cortical ou sous-cortical (Jeannerod, 2001). La copie de la commande produite permet au modèle prédictif d'estimer les conséquences temporelles de l'action. Ainsi, si ces deux modèles inverses et prédictifs fonctionnent bien ensemble on observera une invariance temporelle entre le mouvement exécuté et imaginé.

Donc que le mouvement soit imaginé ou réel, les deux processus réel et imaginé font tous les deux l'objet des mêmes contraintes qui sont la précision et la vitesse en rapport avec l'environnement.

Ce qui différencie le processus de modèle interne et le processus d'imagerie motrice est que ce premier n'est pas accessible à la conscience, alors que le second l'est, car le sujet imagine l'action avec toutes les sensations proprioceptives et kinesthésiques associées au mouvement. L'IM semble donc s'associer directement à ce processus prédictif en établissant des paramètres proactifs pour le mouvement en préparation, codés spatialement ; mais aussi en termes kinesthésiques avec la prise en compte du paramètre de la force et du déroulement temporel (Wilson, Maruff, Ives & Curries, 2001). On peut donc supposer que l'imagerie motrice correspondrait à la copie d'efférence d'un mouvement. Elle permet de planifier un mouvement et les mêmes mécanismes neuronaux sous-jacents à ses phénomènes ont été constatés (l'aire motrice supplémentaire, le cervelet et le cortex préfrontal).

Au préalable, pour que le sujet puisse avoir accès à la représentation de l'action grâce au processus d'imagerie motrice, cela implique qu'il ait accès à une connaissance implicite de son corps en mouvement pour pouvoir comparer une action motrice imaginée avec son format exécuté. En effet, lorsqu'un individu fait appel à des représentations motrices dans le but de s'imaginer faire une action ou la produire réellement, il informe le SNC sur l'état initial du corps et sur son activité (Guilbert *et al.*, 2013). Il est donc nécessaire d'avoir une connaissance du schéma corporel et une mémoire de rappel du répertoire d'action du sujet. (Johnson, 2000 ; Smits-Engelsman & Duysens, 2008 in Guilbert *et al.*, 2013).

5. Les paradigmes d'imagerie motrice

L'IM est un processus qui n'est pas directement observable (Guilbert *et al.*, 2013) mais qui est accessible à la conscience. Pour l'étudier et pour prouver son existence, les auteurs ont dû faire appel à l'utilisation de paradigmes expérimentaux. Ces derniers se basent sur l'idée que l'IM possède une base neurale commune avec l'action réelle. Il y a donc existence d'un continuum entre le processus d'IM et les modèles internes qui permettent tous les deux une représentation de l'action qui peut avoir pour vocation d'être exécutée ou non.

Jeannerod (2001) a proposé de s'intéresser aux caractéristiques préservées entre simulation de l'action et action réelle. Il en décrit deux qui sont les caractéristiques biomécaniques et les caractéristiques temporelles. Ces paradigmes vont ensuite permettre d'observer le bon fonctionnement des substrats neuraux prouvant l'intégrité des modèles internes.

5.1. Le paradigme de jugement de l'action

Ce paradigme s'appuie sur l'hypothèse que la représentation de l'action va être corrélée aux possibilités et aux limites anatomiques du corps. Il utilise le mécanisme de rotation mentale, des participants ont été amenés à juger s'il est possible ou non de réaliser une action donnée.

Les matériels les plus souvent utilisés, pour rendre compte de ce paradigme, sont des photographies de mains sous différentes orientations angulaires. Le sujet doit se prononcer sur la latéralité des images ou sur la possibilité de réaliser un geste de préhension sans produire de mouvement réel. Le temps de réaction est supposé refléter le temps nécessaire pour simuler implicitement les mouvements de rotation de la cible présentée. Les résultats des différentes études ont montré que les participants utilisaient bien un processus d'imagerie motrice et non un processus d'imagerie visuelle.

Vingerhoets *et al.*, (2002) ont montré que les temps de réaction pour juger de l'orientation des photos cibles varient en fonction de la nature des stimuli. Lorsque les stimuli sont des outils, les temps de réaction augmentent linéairement en fonction de l'écart angulaire qui sépare la position du stimulus test de celle du stimulus cible. Avec les mains, le temps de réaction des sujets se fait en fonction de l'écart angulaire que produirait la rotation de la cible et des contraintes biomécaniques qu'implique cette rotation. La non-linéarité des temps de réaction

traduit de la difficulté qu'éprouvent les sujets à simuler des mouvements difficiles ou impossibles à réaliser du fait des contraintes biomécaniques (Guilbert *et al.*, 2013).

Parsons (2001 in Mulder, 2007) a montré que le temps nécessaire pour déterminer si une image pivotée d'une main représente une main gauche ou une main droite est lié au degré de rotation de l'image. Il remarque aussi que lorsque les positions des mains sur les photographies sont biomécaniquement difficiles à reproduire, le temps de réponse augmente proportionnellement à la difficulté de la tâche et que le temps de rotation est similaire au temps de rotation réel des mains pour ces positions. Sirigu & Duhamel (2001 in Barhoun, 2019) constatent que les effets biomécaniques sont propres aux stratégies de performance d'IM et sont absentes des formes d'imagerie non motrices (par exemple : l'imagerie visuelle).

5.2. Le paradigme de chronométrie mental

Ce paradigme repose sur l'existence d'une invariance temporelle entre actions mentales et actions réelles ainsi les caractéristiques temporelles sont respectées dans les deux situations (Decety, Jeannerod & Prablanc, 1989). Il permet d'étudier les corrélations entre le temps que met un sujet pour exécuter mentalement une action et le temps nécessaire pour exécuter cette même action. Ce phénomène s'appelle l'isochronie temporelle.

Une des contraintes objectivant cette invariance temporelle s'explique par la loi de Fitts. Cette loi postule que la vitesse d'atteinte d'une cible va varier selon la taille et la distance de cette dernière sous la contrainte de la rapidité. La loi de Fitts régule les activités motrices de déplacement, de prise d'objet ou de pointage en réel et en IM aussi.

Decety & Jeannerod (1995) ont cherché à prouver que la loi de Fitts est valable dans l'IM. Ils ont demandé à des sujets naïfs de s'imaginer marcher dans un environnement virtuel vers des portes de différentes largeurs placées à trois distances différentes. Les résultats montrent que le temps de marche mental augmentait d'une porte à une autre et qu'il variait aussi en fonction de la largeur de la porte. Decety retrouve donc une linéarité entre l'indice de difficulté de la tâche et l'augmentation du temps de mouvement imaginé. Cela permet de dire que simuler une action prend autant de temps que la réaliser.

5.3. Les précautions à prendre pour manipuler ces deux paradigmes

Il est indispensable de savoir si l'enfant a les capacités cognitives et le niveau d'attention nécessaire pour comprendre ce qu'on attend de lui. Il est aussi important de savoir si l'enfant fait bien de l'imagerie motrice et non de l'imagerie visuelle (Gabbard & Bobbio, 2011).

6. Résultats des études expérimentales portant sur l'évaluation de l'IM dans le cadre du TDC

Comme cela a été vu dans la première partie, il est possible que les symptômes retrouvés dans le trouble développemental de la coordination puissent être expliqués par un déficit de modélisation interne. Le dysfonctionnement de ce mécanisme est le même que celui qui altère la capacité d'IM.

Un postulat a été décrit par Wolpert *et al.*, (1995) qui est que, chez l'enfant TDC, il y a un déficit de la modélisation du mouvement. Les performances motrices lentes et variables des enfants TDC seraient dues à une altération des processus associés à la modélisation en aval de la copie d'efférence. Donc le contrôle des actes moteurs volontaires en cours d'exécution dépend davantage des signaux moteurs lents et afférents (Wilson et McKenzie, 1998).

Hypothèses des déficits des enfants TDC dans l'utilisation des modèles internes inverse et prédictif :

- Les enfants TDC présentent des difficultés à se représenter, en interne, une action ou un modèle anticipé de l'action en préparation ;
- La copie d'efférence produite par les enfants TDC n'est pas performante ;
- Existence d'un déficit de planification ;
- Lors d'une action, l'enfant TDC est dépendant des signaux de réafférences.

L'enfant TDC se retrouve donc en difficulté dans des environnements rapidement changeants et complexes, dans la modulation de sa force, de sa vitesse et lors d'apprentissage d'habiletés motrices. Cette capacité réduite, à développer et à mettre à jour des modèles internes a pour

conséquence la nécessité d'un temps de pratique plus long et plus intensif pour produire des représentations d'action. En outre, les difficultés rencontrées chez le TDC et le déficit de modélisation interne peuvent suggérer un dysfonctionnement plus fondamental ; c'est-à-dire au niveau cérébral en particulier, au niveau du cortex pariétal postérieur et du cervelet, où sont traitées et stockées les représentations d'actions (Wilson *et al.*, 2013).

Pour investir ces problématiques, les différentes études portant sur le TDC ont utilisé l'imagerie motrice, car c'est un processus sous-jacent de la représentation de l'action et qu'il peut être conscient. Il peut rendre compte de l'intégrité des modèles internes prédictifs et inverses. Pour évaluer les capacités d'imagerie motrice chez un individu, les auteurs de différentes études expérimentales se sont appuyés sur les paradigmes de jugement d'action et de chronométrie mentale.

6.1. Déficit de performance d'utilisation de l'Imagerie motrice

Deconinck *et al.*, (2009) ont investi l'hypothèse du déficit d'imagerie motrice chez les enfants TDC en utilisant le paradigme de rotation mentale. Ils ont utilisé des postures de mains et des stimuli physiques et alphanumériques. L'enfant devait juger de la latéralité pour la première tâche et de l'angle de rotation pour la seconde tâche. Les résultats indiquent que les enfants avec TDC ont bien utilisé l'imagerie motrice pour résoudre les problèmes de rotation mentale. Mais, ils se sont généralement montrés plus lents et faisaient plus d'erreur que les enfants de l'échantillon contrôle. Les auteurs en concluent que le jugement du groupe DCD semble être compromis par un modèle interne moins bien défini.

6.2. Corrélation entre le déficit d'IM et les habiletés motrices chez un enfant porteur de TDC

Williams, Thomas, Maruff et Wilson (2008) ont examiné la capacité d'IM des enfants TDC âgés de 7 à 11 ans avec l'intention de déterminer si le degré des compétences motrices différait de leur performance aux tâches d'IM. Les enfants TDC ont été séparés en deux groupes de niveau (TDC Sévère et Léger) et comparés à des enfants contrôle du même âge. Les participants ont effectué deux tâches d'IM qui étaient une tâche de rotation de la main et une tâche de rotation de tout le corps (avec et sans des instructions spécifiques d'imagerie). Les résultats indiquent que les enfants du groupe TDC Sévères (TDC-S) présentent un déficit généralisé

d'IM, en ce sens qu'ils sont moins précis d'une tâche à l'autre que les sujets contrôles et que le groupe TDC Légers (TDC-L) pour la tâche manuelle. Ils présentent aussi peu d'avantages lorsqu'on leur donne des instructions d'imagerie spécifiques. Le groupe TDC-L semble capable d'effectuer des transformations d'IM simples, mais ils échouent plus à mesure que la complexité de la tâche augmente. Contrairement au groupe TDC-S, le groupe TDC-L a montré certains avantages d'instructions d'imagerie spécifiques avec une précision accrue de la tâche avec les mains. Les données trouvées suggèrent que le déficit d'IM n'existe pas chez tous les enfants TDC mais qu'il est corrélé aux compétences motrices. Un degré sévère de TDC semble plus significativement lié à de moins bonnes capacités d'IM.

6.3. Vérification de la loi de Fitts chez les enfants TDC

En 2008, Lewis et al., ont examiné la durée de mouvement réalisé en réel et en imaginaire grâce au test *Visually Guided Pointing Task* (VGPT) chez des enfants de 8 à 12 ans et les résultats montrent que le groupe d'enfants TDC présentait une incapacité à générer les mouvements imaginés. Ce constat n'a été ni retrouvé chez les enfants au développement typique ni chez les enfants porteurs de TDA/H et chez les enfants comorbides TDC – TDA/H. Pour conclure, le compromis vitesse – précision expliqué par la loi de Fitts n'a pas été retrouvé lors des tâches chez les enfants TDC. (William *et al.*, 2013).

6.4. Déficit de prédiction du premier mouvement oculaire

La tâche de saccade en deux temps (DSST) a été utilisée pour tester l'hypothèse selon laquelle les enfants atteints d'un TDC présenteraient des difficultés dans le traitement des signaux visuospatiaux de la copie efférente. Les enfants étaient moins précis en termes de position finale de l'œil sur les secondes saccades. Ce constat peut être lié à une altération du système dynamique des modèles internes. Il est possible que des anomalies dans le traitement des signaux de copie d'efférence puissent être à la base d'une maladresse motrice chez la majorité des enfants atteints de TDC. Cette altération de la modélisation prédictive se situerait au niveau du lobe pariétal.

6.5. Méta-analyse sur la performance des enfants TDC aux tâches de rotation manuelle (Barhoun *et al.*, 2019)

Cette méta-analyse très récente, regroupe 8 études basées sur la tâche de rotation manuelle et sur les performances des enfants atteints de TDC. L'idée principale est que la tâche de rotation mentale est une mesure valide de l'IM, elle consiste à identifier la latéralité des stimuli de mains qui apparaissent à l'écran sous différents angles. Le mécanisme pour répondre à ces problèmes est l'IM, car on a pu voir que les performances des sujets sont généralement conformes aux mêmes contraintes biomécaniques que dans le mouvement réel (Spruijt *et al.*, 2015).

Dans le cas du TDC, on retrouve dans la plupart des études que ces sujets affichent des profils de performance cohérent avec une stratégie d'IM mais que leur performance au test de rotation manuelle est atypique avec une grande variabilité. Certaines études révèlent seulement un déficit dans la précision de la réponse alors que d'autres mettent en avant des déficits dans le temps de réaction et dans la précision. Néanmoins, il faut prendre en compte que la méthodologie employée n'est pas la même dans ces 8 études.

De plus, l'article montre que le temps de réponse et le nombre de réponses, chacun pris isolément, ne montrent pas d'effet significatif et en vu de la grande variabilité d'une étude à l'autre, les auteurs ont supposé qu'un indice d'efficacité pourrait rendre compte des performances du test de rotation mental chez les personnes atteintes de TDC. Ils l'ont appelé IES (mean inverse efficiency).

Ainsi, le but de cette étude est de fournir la première revue méta-analytique, résumant quantitativement la littérature traitant de la performance de l'IM chez les enfants atteints de TDC, au test de rotation manuelle.

Les résultats suggèrent que tous les enfants (sans ou avec TDC) ont bien utilisé la stratégie d'IM. Les enfants TDC montrent des performances réduites par rapport aux groupes contrôles, avec des temps de réaction plus long, une précision réduite et un indice IES moyen réduit également. Cet indice IES semble plus puissant pour détecter les déficits de performances des enfants TDC ; il peut donc être une alternative, plus sensible que le temps de réaction et la précision, pour rendre compte des différences de performances à la tâche de rotation manuelle. Par ailleurs, la capacité réduite à s'engager dans une stratégie d'IM, démontrée par les enfants

TDC pendant l'exercice, fournit un soutien solide à l'argument selon lequel la modélisation interne prédictive peut être compromise chez ces enfants.

Pour conclure, Wilson *et al.* (2013) rassemblent des données convergentes montrant que les enfants atteints de TDC ont une capacité réduite à développer et à mettre à jour des modèles internes et, de ce fait, nécessitent plus de temps et de pratique pour créer des représentations d'action. Plus précisément, ils ont des difficultés à générer ou à utiliser des estimations prédictives de la position du corps comme moyen de corriger les actions en temps réel. Cela affecte aussi la capacité à apprendre de nouveaux modèles internes ou à modifier les modèles existants par rapport aux essais d'apprentissage répétés.

IV. Intérêt et justification de l'étude et du mémoire

1. Les outils actuels

L'imagerie motrice est un phénomène découvert assez récemment et elle est considérée comme un moyen de simulation de l'action. Différents auteurs se sont intéressés à son lien avec la théorie des modèles internes du contrôle moteur et ils ont validés l'existence d'un *continuum fonctionnel* entre les deux mécanismes. L'étude de l'IM a pu être possible par l'utilisation de deux paradigmes s'appuyant sur des caractéristiques communes entre action réelle et action imaginée. Ce sont les paradigmes de jugement d'action et de chronométrie mentale.

Ensuite à partir de ces paradigmes et de contraintes de tâches, des outils impliquant l'utilisation de l'imagerie ont été développés tels que le comptage des mouvements ou du temps, des tâches de pointages réelles et/ ou imaginées (Ferguson *et al.* 2015). Ces outils rendent ainsi compte de la capacité du sujet à se représenter et simuler une action et donc, de l'efficacité des modèles inverses et prédictifs du contrôle moteur. Les plus couramment utilisés, au niveau expérimental, sont : la tâche de pointage à guidage visuel (VGPT) (Marruf *et al.*, 1999 ; Sirigu *et al.*, 1996 in Ferguson *et al.*, 2015), la tâche d'ajustement radial virtuelle (C-VRFT) (Caeyenberghs *et al.*, 2009 ; Smits-Engelsman & Wilson, 2013 in Ferguson *et al.*, 2015) et la tâche de rotation manuelle (Sirigu & Duhamel, 2001).

1.1. Le VGPT

Cet outil consiste à demander au sujet d'effectuer une série de mouvements de va-et-vient consécutifs, à l'aide d'un stylo, d'un côté d'une ligne tracée sur une feuille à l'autre côté où se trouve une cible. Le sujet doit faire 5 allers et retours successifs. Des planches de différentes tailles sont présentées les unes après les autres (Ferguson *et al.*, 2015). La tâche nécessite une bonne planification de la force, de la vitesse et de l'amplitude du contrôle moteur pour être réussie. Néanmoins, ce test demande une forte sollicitation cognitive et des capacités de double tâche. En effet, le sujet doit prévenir oralement l'évaluateur quand il a fini d'effectuer les trajets et il y a un comptage. Ainsi, ces contraintes peuvent altérer les performances d'imagerie de l'enfant TDC, car très souvent il peut présenter parallèlement des dysfonctionnements exécutif et cognitif.

1.2. Le C-VRFT

Cet outil se présente sous la forme d'une séquence de cinq cibles distinctes avec un début et une fin. Le sujet doit faire une séquence de cinq mouvements de va-et-vient vers des cibles distinctes situées sur un axe radial depuis une base principale. Il est numérisé, ce qui permet à l'expérimentateur d'avoir un profil cinématique du mouvement et de la précision, qui sera très proche de ce qui a été produit. Cette tâche demande une capacité de planification élevée, de l'anticipation et un mouvement plus complexe, car le retour après le pointage de la cible se fait dans un point et chaque mouvement s'exécute sur un rayon différent. Elle présente aussi l'avantage de moins faire intervenir la demande cognitive, car les sujets ne sont plus obligés de verbaliser la fin de la séquence (Caeyenberghs, Wilson *et al.*, 2009) et il n'y a pas de comptage. La limite de cet outil est qu'il demande d'être très précis. Donc, lorsqu'une variabilité d'exécution est retrouvée, elle peut se traduire par un déficit en IM, mais aussi par des déficits de contrôle dans l'activation des muscles agonistes et des muscles antagonistes chez l'enfant porteur de TDC (Ferguson *et al.*, 2015)

1.3. La tâche de chronométrie mentale

Auparavant, cette tâche impliquait de réaliser des mouvements en réel puis de s'imaginer les faire (Spruijt *et al.*, 2015). Cette forme d'imagerie était dite « explicite ». Ensuite, a été développé la tâche de rotation manuelle ; validée pour mesurer la capacité d'IM ; elle consiste

à demander à des sujets d'identifier la latéralité des stimuli de la main qui apparaît sur l'écran sous différents angles. Cependant, il existe une forte hétérogénéité dans la passation de cette tâche, comme le nombre d'angles et de points de vue utilisés pour présenter le stimuli, l'occlusion des mains du participant lors de l'achèvement de la tâche et la méthode de réponse utilisée. Ces différences de méthodologies peuvent influencer la performance au test de rotation manuelle (Barhoun *et al.*, 2019). Le type d'instructions varie aussi d'une étude à l'autre. Certaines études explicitent l'utilisation de l'IM (Noten *et al.*, 2014 ; Reynold *et al.*, 2015 ; Williams *et al.*, 2006 ; Williams *et al.*, 2011 ; Williams *et al.*, 2013 in Barhoun, 2019) et d'autres ne donnent aucune instruction (Deconinck *et al.*, 2009 ; Fuelscher *et al.*, 2016 ; Adams *et al.*, 2017 ; Lust *et al.*, 2006 in Barhoun, 2019).

Fuelscher *et al.*, (2016) dans leur étude, présentaient des mains aléatoirement par incrémentation de 45° entre 0 et 360°, ces mains restaient à l'écran jusqu'à ce qu'une réponse soit enregistrée en appuyant sur une touche du clavier de l'ordinateur. Les stimuli étaient montrés soit en vue dorsale soit en vue palmaire, et pour chacun des stimuli, le temps de réponse a été enregistré. Les sujets n'ont pas reçu d'instructions précises indiquant l'utilisation d'images. Chaque participant a effectué 5 essais pratiques suivis de 80 essais (Fuelscher *et al.*, 2016). Les résultats montrent que le temps de réaction est plus long quand la rotation de la main est latérale plutôt que médiane et lorsque les mains sont présentées en vue palmaire, c'est-à-dire dans une position incongrue. Ils démontrent aussi un effet plafond des scores pour les enfants les plus âgés, les adolescents et les adultes dans cette tâche. Ce constat a aussi été indiqué par Hyde *et al.*, (2013). Pour finir, les enfants qui ont participé à l'étude ont bien engagé une stratégie d'IM et leur performance s'est considérablement améliorée de 6 à 12 ans, ce qui reflète une capacité à générer de mieux en mieux des représentations d'actions internes.

2. Intérêt de l'utilisation des tests d'IM

Les différentes expériences menées pour étudier les capacités d'imagerie motrice, grâce aux différents paradigmes, ont permis d'obtenir des résultats chiffrés rendant compte du lien entre le mouvement exécuté réellement et le mouvement exécuté en imagerie.

On sait que plus le coefficient de corrélation est proche de la valeur extrême 1, plus la corrélation est positivement forte. Ainsi, Smits-Engelsman & Wilson (2013) ont trouvé une corrélation d'environ 0,70 entre le mouvement réel et imaginaire. Par ailleurs, la relation

logarithmique définie par la loi de Fitts des performances réelles et imaginaires est proche d'une valeur de R de 0,90 d'après Wilson, Maruff, Ives & Curries (2001) donc le compromis vitesse-précision est vérifié dans les deux conditions.

3. Justification du projet

Le Trouble développemental de la coordination est avant tout un problème de coordination. Il ne peut en aucun cas se réduire à un déficit d'imagerie motrice et de modélisation interne. En effet, il existe une grande variabilité de déficit d'un enfant à un autre. De plus les études portant sur le TDC présentent aussi une grande variabilité dans les résultats.

Cependant, le déficit d'imagerie motrice peut être sous-jacent dans le TDC, ce qui peut venir entraver les performances motrices d'un sujet. Dans une démarche de diagnostic, il peut s'avérer nécessaire d'évaluer les capacités d'IM d'un enfant.

3.1. L'arbre décisionnel

Cet arbre permet de rendre compte de la démarche de diagnostique à préconiser devant un enfant suspecté d'avoir un déficit moteur.

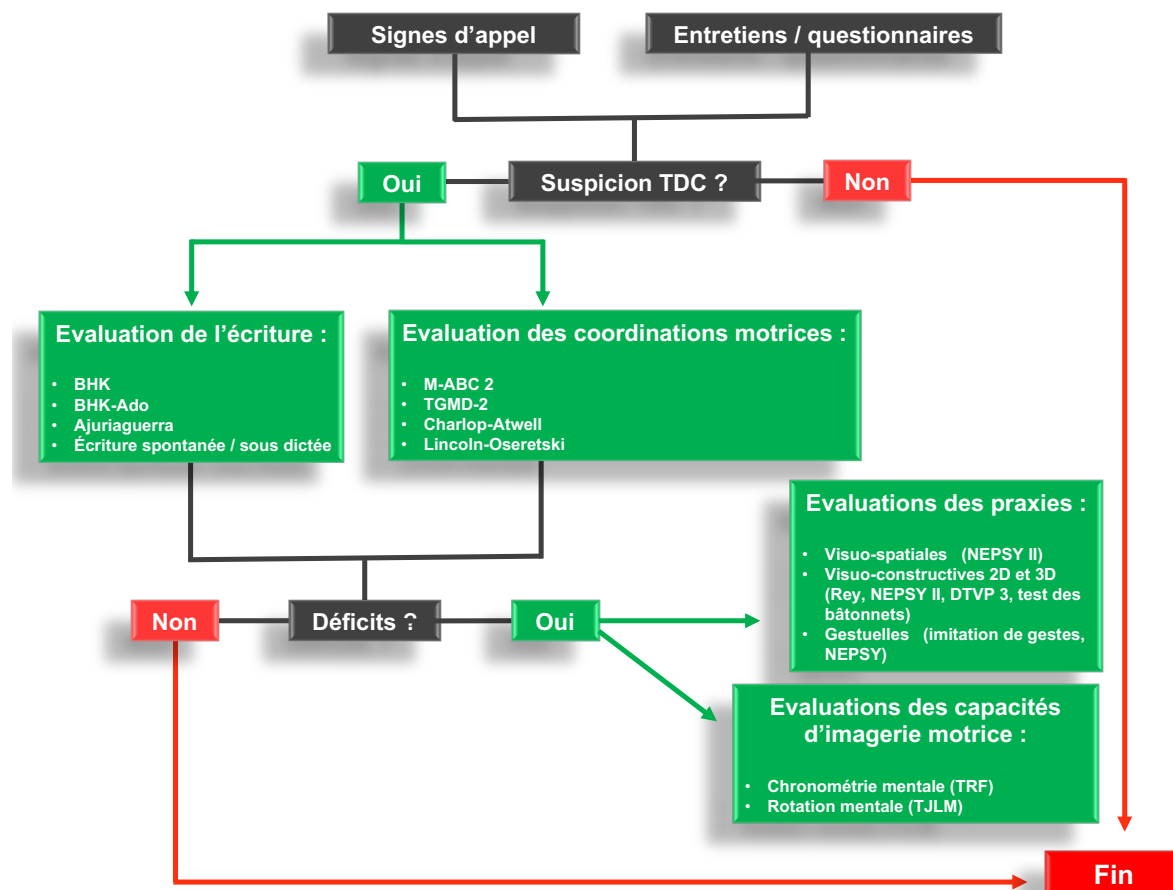


Figure 4 : Arbre décisionnel devant une suspicion de TDC

Devant un enfant suspecté de TDC, le clinicien doit tout d'abord recueillir les signes d'appel. Il va se renseigner sur ses performances et compétences motrices, l'impact de ses difficultés sur les activités de la vie quotidienne, en milieu scolaire et comment il y fait face. Au niveau social, on va chercher à savoir si l'enfant est bien intégré, quelle est sa participation dans des groupes. Puis, on regarde les facteurs environnementaux, le statut socio-économique de la famille, le soutien familial et scolaire. Si du matériel ou des activités sont déjà adaptés pour lui. Pour cela, on peut utiliser des questionnaires comme le « Questionnaire de Coordination » (The Coordination Questionnaire – DCDQ- Wilson *et al.*, 2000).

Si après l'étude des informations récoltées, il n'y a pas de véritables difficultés alors le clinicien peut prendre la décision d'arrêter la démarche, mais si des déficits sont observés le clinicien va entamer une évaluation des compétences de l'enfant grâce à des tests étalonnés qui rendent compte des coordinations motrices et de l'écriture dans un premier temps.

Suite à cette première évaluation, le clinicien prend la décision de tout arrêter si les déficits ne sont pas significatifs ou si c'est le cas, il est alors pertinent que le clinicien procède à une seconde évaluation qui rend compte de l'intégrité de processus qui peuvent intervenir dans le TDC qui sont l'évaluation de l'imagerie motrice et des praxies.

En effet, l'enfant peut n'avoir des problèmes moteurs que sur certains niveaux, il est donc pertinent de faire une évaluation précise de ses compétences. Cette démarche de diagnostic permet aussi de construire un profil complet de ce qui va bien chez l'enfant et ce qui sous-tend ses problèmes d'habiletés motrices.

3.2. Le projet d'étude

Afin de faire avancer la pratique clinique du psychomotricien sur le plan diagnostique et sur le plan de la prise de décision thérapeutique, dans le dépistage du trouble développemental de la coordination ; deux tests d'imagerie motrice, rendant compte des paradigmes de chronométrie mentale et de jugement d'action, ont été adaptés et vont être étalonnés sur une population française. Ce sont la Tâche Radiale de Fitts (TRF) et le Test de Jugement de Latéralité Manuelle (TJLM).

L'intérêt de ce projet est donc de construire des normes d'étalonnages auprès d'enfants tout venant à des fins cliniques, c'est-à-dire de dépistage, de diagnostic et d'évaluation. A terme, ces étalonnages permettront aux cliniciens (psychomotriciens, neuropsychologues, ergothérapeutes, kinésithérapeutes) de situer les capacités d'imagerie motrice d'un patient par rapport à la norme.

Dans ce mémoire nous allons dans un premier temps, essayer de rendre compte de la sensibilité de chaque test, et de savoir si l'on observe des différences de performances significatives entre les âges et sexes pour la condition réelle et pour la condition imaginée. On va aussi chercher à rendre compte de l'isochronie temporelle entre mouvement exécuté et mouvement imaginé dans les deux outils. Ces hypothèses, si elles sont vérifiées permettront à terme de faire de ces deux outils des tests standardisés.

Partie Pratique

I. Présentation de l'étude

1. Objectif et but général de l'étude

Cette étude s'intéresse à deux tests d'imagerie motrice développés dans des études expérimentales. Il s'agit de la « Tâche Radiale de Fitts » et du « Test de Jugement de Latéralité Manuelle ». Cependant, ces outils n'ont été utilisés, pour le moment, qu'en condition expérimentale et sur des populations non-française.

Cette étude vise donc à étalonner les deux tests d'imagerie motrice les plus couramment utilisés dans le domaine de la recherche sur une population d'enfants tout venant scolarisés du C.P. au collège. Le but est d'établir des normes à des fins cliniques (dépistage, diagnostic, évaluation d'une thérapeutique). Pour cela, la Tâche Radiale de Fitts a été adaptée sous le format papier-crayon afin qu'il puisse être utilisé par la suite par les autres professionnels de santé. Ce projet est encadré par Mr. Puyjarinet.

2. Rappel qualité métrique et statistique

La Tâche Radiale de Fitts et le Test de Jugement de Latéralité Manuelle ont fait l'objet d'une analyse descriptive permettant de rendre compte des qualités métriques attendues pour un test. Nous rappelons ici, les notions qui vont être utilisées dans la suite du mémoire.

La validité

Un test est dit valide s'il mesure correctement le phénomène qu'il est censé mesurer (Albaret & de Castelnaud, 2005). Ce concept regroupe plusieurs éléments : validité de contenu, validité de construction, validité de critère, etc. La validité des deux tests d'IM peut être d'ores et déjà considérée comme reconnue, compte-tenu du fait que les épreuves sont très largement utilisées pour évaluer les capacités d'IM dans des populations développementales saines ou non. Leur validité est attestée, par exemple, par les concepts qui s'y rattachent tel que la modélisation interne des mouvements (Adams et al., 2014, pour une revue), ainsi que par des méta-analyses (ex. : Barhoun et al., 2019).

Dans un premier temps, l'évaluateur est amené à noter certains renseignements relatifs à l'enfant comme la date de naissance, le sexe, la date de passation. On renseigne également la main dominante de l'enfant en fonction de sa main d'écriture. On note aussi, au cours de la passation, tous ce qui a pu modifier les performances de l'enfant comme une personne qui est entrée accidentellement dans la salle ou le bruit de la sonnerie de l'école.

La passation se déroule dans l'ordre suivant :

- Le subtest Dextérité Manuelle du M-ABC 2 : l'enfant doit placer les chevilles l'une après l'autre le plus vite possible sur la planchette. Cette tâche est effectuée une fois par l'enfant avec sa main dominante. Cependant, si l'enfant prend deux chevilles à la fois, s'il change de main pendant l'essai ou s'il fait tomber une cheville, alors un deuxième essai est administré. Le temps mis par l'enfant pour réaliser la tâche est relevé par l'évaluateur.
- La Tâche Radiale de Fitts
- Le Test de Jugement de Latéralité Manuelle

Il est nécessaire que l'évaluateur se munisse d'un chronomètre afin de relever les temps de réalisation dans les différentes tâches.

Ensuite, pour les deux tests d'évaluation des capacités d'IM, nous indiquerons les éléments suivants : le matériel, la procédure et les consignes.

II. Les deux tests d'évaluation de la capacité d'imagerie motrice

1. La Tâche Radiale de Fitts

1.1. Matériel

La Tâche radiale de Fitts est constituée de 20 planches papier au format A4. Chaque planche est composée d'une case « début » à gauche, en bas de la feuille et d'une case « fin » en bas à droite de la feuille. Entre ces deux cases se trouve un cercle cible rouge central. Dans la partie

supérieure de la feuille, sont disposés 5 cibles carrées grises, positionnées le long d'axes radiaux à partir du cercle rouge central. Dans cette tâche, il y a 5 largeurs de cibles différentes (40 mm, 20 mm, 10 mm, 5 mm et 2,5 mm), elles rendent compte de l'indice de difficulté de la tâche.

L'enfant est muni d'un critérium, qui n'a pas de mine avec lequel il effectue les trajets.

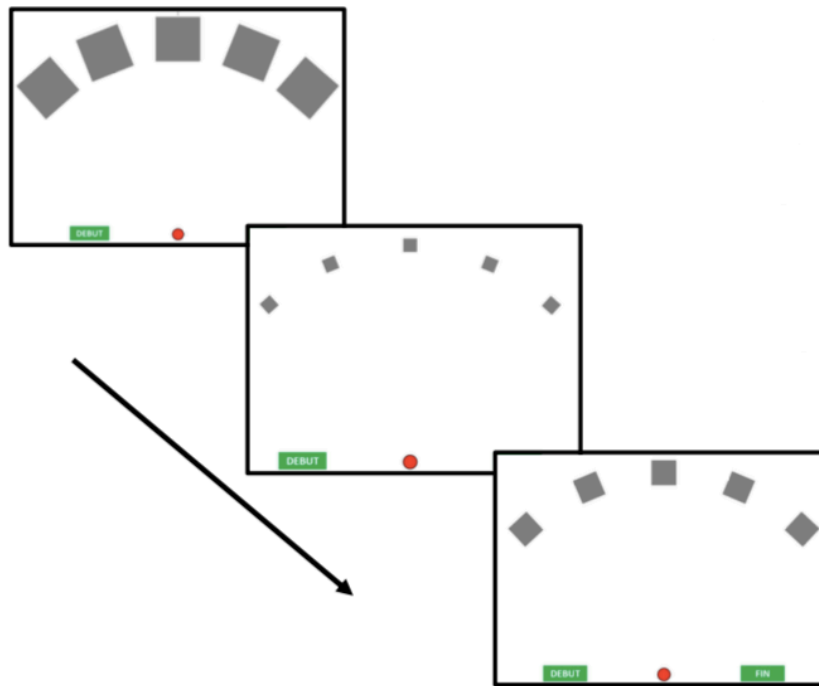


Figure 5 : Exemples de planches A4 de la Tâche Radiale de Fitts

1.2. Procédure

Pour chaque indice de difficulté (40, 20, 10, 5 et 2,5 mm), l'enfant effectue la tâche deux fois en mouvement réel et deux fois en mouvement simulé (IM). Il est demandé à l'enfant d'utiliser explicitement une stratégie d'imagerie motrice. L'ordre des planches présentées à l'enfant est prédéfini avec les indices de difficulté répartis aléatoirement mais on alterne à chaque fois la condition réelle et la condition simulée (IM). L'enfant et l'examineur sont installés face à face de part et d'autre d'une table. La planche est présentée avec les cases « départ » et « fin » au plus près de lui. Dans les deux conditions, l'enfant commence par venir mettre son crayon sur la case « départ ». L'évaluateur déclenche le chronomètre lorsque l'enfant quitte la case puis il l'arrête dès que l'enfant place son crayon dans la case « fin ».

A chaque fois que la tâche est réalisée, l'évaluateur marque sur la feuille de notation (cf. Annexe 1) le temps que l'enfant a mis pour effectuer le trajet puis il enlève la dernière planche utilisée pour en présenter une nouvelle. Il précise à chaque fois dans quelle condition l'enfant doit réaliser la tâche, c'est-à-dire soit en condition réelle soit en condition simulée (IM).

En condition réelle, l'enfant va tout d'abord venir pointer la mine du critérium dans le cercle cible rouge et à partir de là, il vient pointer son crayon dans la première cible carrée qui se trouve tout à gauche de la planche. Il revient sur le cercle rouge puis pointe le critérium sur la cible carrée suivante pour ensuite revenir sur le cercle rouge et ainsi de suite jusqu'à la dernière cible carrée qui se situe à droite de la planche. Après, il revient sur le cercle cible rouge et pour finir il vient mettre la pointe du crayon sur la case « fin ».

En condition simulée (IM), l'enfant vient pointer son crayon dans la cible cercle rouge. Là, il garde son crayon dans la cible et s'imagine faire les va-et-vient entre les cibles carrées et le cercle cible rouge comme en condition réelle mais sans effectuer de mouvement. Il doit s'imaginer bouger son bras et le crayon pour venir pointer successivement le critérium dans chaque cible et dans le cercle rouge. Quand l'enfant a fini d'effectuer le trajet, il déplace son critérium sur la case « fin », cela permet d'informer l'évaluateur que l'enfant a fini de simuler la tâche.

Lors de la passation, il est nécessaire que l'évaluateur fasse attention que l'enfant n'effectue aucun mouvement en condition simulée et qu'il reste précis lors des pointages en condition réelle.

A la toute fin de la passation de la Tâche Radiale de Fitts, l'évaluateur demande à l'enfant de lui expliquer la stratégie qu'il a mis en place lorsqu'il devait effectuer le trajet en condition simulée. L'évaluateur note sur la feuille de notation, la stratégie décrite par l'enfant.

1.3. Les consignes

L'évaluateur présente la planche avec l'indice de difficulté de 40 mm à l'enfant et lui donne la consigne suivante :

« Tu vois ici, il y a un rond rouge et ici cinq carrés. Tu vas faire des allers-retours entre le rond et chaque carré. Tu dois être bien précis et bien rentré à chaque fois dans le rond et chaque carré en allant le plus vite possible ».

L'évaluateur réalise une démonstration puis l'enfant réalise la même démonstration.

« Très bien, maintenant tu vois il y a un début et une fin, tu commences par pointer le début, puis tu fais les allers-retours entre le rond et les carrés et quand tu as fini, tu pointes sur la case "fin" ».

L'évaluateur fait la démonstration de la tâche complète puis c'est au tour de l'enfant. Ensuite, on utilise une planche avec une taille de cible de 20 mm, et la consigne suivante donnée est :

« Tu vois, il y a différentes tailles de carrés. Parfois, je vais te demander de le faire en vrai, parfois je vais te demander de le faire en t'imaginant. Tu vas sur la case début, puis sur le point rouge et là dans ta tête tu t'imagines en train de faire les allers-retour entre le point rouge et chaque carré avec ton bras et ton crayon. Quand tu as fini de te l'imaginer, tu vas sur la case "fin" ».

L'évaluateur fait la démonstration à l'enfant en condition simulé (IM) puis il demande à l'enfant de le faire. Si l'enfant bouge la main, le crayon ou une autre partie du corps, l'évaluateur répète les consignes à l'enfant et un nouvel exemple peut être effectué par celui-ci. Si, on observe que le crayon reste bien sur le cercle rouge en IM, l'évaluateur peut commencer le protocole randomisé :

« As-tu des questions ? Non, est ce que tu es prêt ? Aller c'est parti, tu vas devoir effectuer la tâche en condition ... »

2. Le Test de Jugement de Latéralité Manuelle

2.1. Matériel

Ce test se présente sous la forme d'un diaporama informatisé. Il est donc nécessaire d'être muni d'un ordinateur et il est très recommandé d'utiliser une souris d'ordinateur sans fil pour faire passer les diapositives d'image de main. L'évaluateur aussi doit avoir en main un chronomètre.

Le diaporama se compose de deux exemples et ensuite de 48 stimuli. Les stimuli sont des mains présentées à l'enfant. Les 48 stimuli se composent d'image de mains dans 6 positions angulaires différentes pour la main droite et pour la main gauche. Donc, on a 12 images de mains distinctes puis chaque position se répète 4 fois dans l'épreuve.

Entre chaque stimulus, se trouve sur une diapositive noire qui permet d'arrêter la stimulation pour l'enfant et elle laisse le temps à l'évaluateur de noter le temps de réponse de l'enfant et sa réponse sur la feuille de notation (cf. Annexe 2)

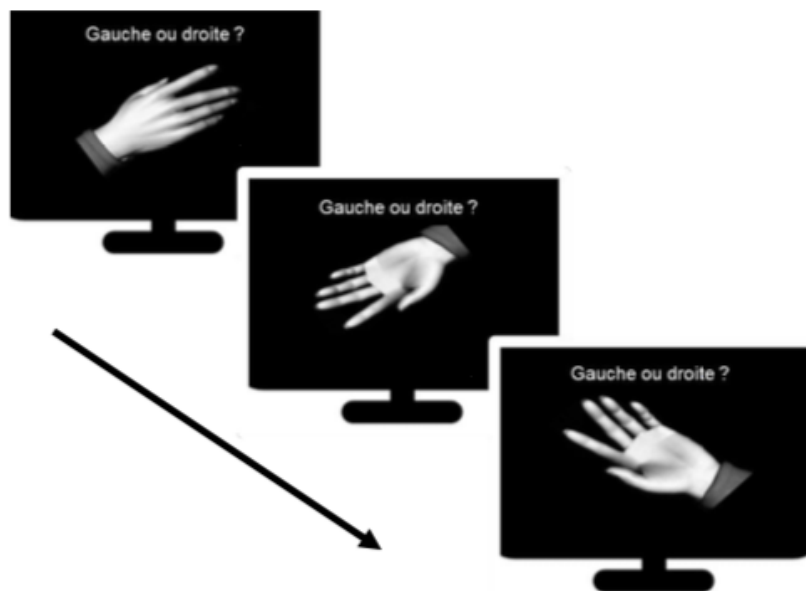


Figure 6 : exemple de stimulus de main présenté à l'enfant lors du Test de Jugement de Latéralité Manuelle

2.2. Procédure

L'enfant est assis devant une table, ses mains doivent être posées sur ses genoux sous la table. Un ordinateur est placé en face de lui sur la table à une distance acceptable.

De son côté, l'examineur doit se trouver un peu éloigné de l'ordinateur et de l'enfant. Il doit se placer de l'autre côté de la table sur sa largeur de manière à se trouver perpendiculaire à l'enfant. Il est important que ce placement soit respecté entre l'évaluateur et l'enfant, pour ne pas perturber son attention. L'évaluateur utilise donc une souris informatique pour faire défiler les images.

Lors de ce test, l'enfant doit déterminer si la main qui lui est présentée, est une main gauche ou une main droite. Pour ce faire, il doit seulement lever la main qu'il lui semble être la bonne, comme s'il levait le doigt et sans effectuer aucun autre mouvement. Pendant, ce temps, l'autre main reste posée sur le genou. Pendant, toute l'épreuve l'enfant doit garder ses yeux sur l'écran, il lui est interdit de regarder ses mains. L'enfant doit donner la réponse le plus vite possible tout en essayant de ne pas se tromper, car seule la première réponse sera retenue dans la notation.

Les consignes sont expliquées dans un premier temps, elles apparaissent au début du diaporama. Ensuite on présente deux exemples à l'enfant. Ces exemples présentent une main gauche et une main droite. Si l'enfant répond correctement, la passation peut débuter sinon il est important de reprendre les exemples avec lui.

Pendant la passation, il est nécessaire de faire attention que l'enfant ne bouge pas ses mains, si c'est le cas, l'évaluateur doit lui répéter les consignes. De son côté, l'évaluateur déclenche le chronomètre dès que le stimulus est présenté à l'enfant et l'arrête dès que l'enfant a levé la main qu'il pense être celle présentée sur l'écran de l'ordinateur. Il note le temps mis par l'enfant pour répondre et la main levée par l'enfant.

A la fin de l'épreuve, l'évaluateur demande à l'enfant quelle stratégie il a utilisé pour déterminer quelle main présentée était une main droite ou une main gauche. L'enfant explique comment il a procédé et l'évaluateur retranscrit son discours sur la feuille de notation.

2.3. Les consignes

L'évaluateur place l'enfant devant l'ordinateur et commence par lui expliquer comment il doit se positionner, et ce qu'il lui est interdit de faire :

« Commence par poser tes mains sur les genoux, tes mains doivent être cachées sous la table. Tu ne devras JAMAIS regarder tes mains tout au long du test »

On explique alors à l'enfant ce qu'il doit faire et comment il doit donner la réponse.

« Ensuite, tu vas voir apparaître à l'écran une main et tu vas devoir m'indiquer si, pour toi, il s'agit d'une main gauche ou d'une main droite. Pour m'indiquer si la main présentée à l'écran est la main gauche ou la main droite, tu devras lever la main concernée comme la petite fille sur la photo ».

« Attention l'autre main doit rester posée sur le genou, tu ne dois faire aucun autre mouvement et tes yeux ne doivent regarder que l'écran. Essaie d'aller le plus vite possible, tout en essayant de ne pas te tromper car je ne compterai que la première réponse ».

L'évaluateur demande à l'enfant s'il a compris la consigne et il lui propose de s'entraîner avec deux exemples :

« On va s'entraîner un peu avant de commencer »

L'évaluateur présente le premier exemple, l'enfant doit répondre par la main gauche. Si la réponse est correcte, le deuxième exemple présentant une main droite est exposé. La passation peut ensuite débiter avec le premier stimulus :

« As-tu des questions ? Es-tu prêt ? C'est parti ».

III. Résultats préliminaires d'étalonnage des tests d'imagerie motrice

A partir des données recueillies, nous avons réalisé une analyse descriptive et statistique qui permettent de rendre compte de la sensibilité des outils d'évaluation de la capacité d'IM selon l'âge et le sexe. Mais aussi d'observer leur validité, c'est-à-dire pour la Tâche Radiale de Fitts, l'invariance temporelle entre mouvement réel et mouvement imaginé.

1. Les variables retenues

L'analyse statistique que nous avons effectuée dans le cadre de ce mémoire repose sur des variables qui ont été obtenues grâce à des moyennes de temps de mouvement de tous les sujets de l'échantillon d'étalonnage, elles ont été ensuite analysées en fonction des âges et du sexe des sujets. On obtient donc plusieurs variables qui sont :

- Le Temps de mouvement réel (moyenné quel que soit l'indice de difficulté) à la Tâche radiale de Fitts ;
- Le Temps de mouvement simulé (IM) (moyenné quel que soit l'indice de difficulté) à la Tâche radiale de Fitts ;
- Le Nombre de bonne réponse au test de Jugement de Latéralité Manuelle ;
- Le Temps moyen de réponse au test de Jugement de Latéralité Manuelle ;
- La Note brute obtenue au subtest de Dextérité Manuelle du M-ABC 2 ;

Ainsi, en réalisant notre analyse de cette manière, cela a permis d'avoir une vision d'ensemble et donc de réaliser une analyse descriptive.

2. Statistique descriptif

Tout d'abord au vu du faible nombre de sujets âgés de 7 et de 11 ans dans l'échantillon d'étalonnage, nous n'avons pas tenu compte de leurs résultats.

Le tableau présenté permet de décrire une vue d'ensemble des performances des sujets qui ont participé à l'étalonnage.

Ils sont appelés facteurs intra-sujets :

- Le facteur Age : (5) : 7, 8, 9, 10 et 11 ans
- Le facteur Sexe : (2) : garçon ou fille
- Le facteur Age (5) X Sexe (2)

3.1. La Tâche Radiale de Fitts

3.1.1. Temps de mouvement moyen en condition réelle

Afin de tester l'effet éventuel de l'âge et/ ou du sexe sur les performances des enfants à la Tâche Radiale de Fitts, la mesure Temps de mouvement moyen en condition réelle a fait l'objet d'analyse de variance (ANOVA) à deux facteurs selon un plan 5(Age) X 2 (Sexe), à l'aide du logiciel JASP.

Dans un test d'hypothèse (ex. : ANOVA), pour avoir un résultat qui montre une différence entre les variables considérées, il faut (en général et par convention) que $P \leq 0,05$.

P est la statistique qui indique la probabilité que l'hypothèse nulle (qui stipule qu'il n'y a pas de différence entre les moyennes) soit vraie. Si $P < 0,05$, alors la probabilité que l'hypothèse nulle soit vraie est inférieure à 5 %. Dans ce cas, on rejette l'hypothèse nulle, c'est-à-dire que l'on admet qu'il existe des différences (non imputables au hasard) entre les moyennes des variables étudiées.

Dans notre cas, l'ANOVA nous indique s'il existe des différences entre les moyennes. Si c'est le cas, on estime la taille de l'effet (par ex. : éta-carré, η^2). Par convention, on estime qu'une taille d'effet dans le cas de η^2 est plus ou moins importante de la façon suivante : .01 = effet faible ; .06 = effet moyen ; .14 = effet important (Cohen, 1988). La taille de l'effet nous donne l'importance (ou la magnitude) de l'effet observé. Pour compléter les résultats d'une ANOVA, et vérifier les différences précises qu'il existe entre les moyennes de variables d'un même facteur, des tests post-hoc sont nécessaires (ex. : test HSD de Tukey).

L'ANOVA à deux facteurs (Age X Sexe) montre un effet du facteur âge sur le temps de mouvement en condition réelle ($[F_{(4,70)} = 2,74 ; P = 0,03 ; \eta^2 = 0,12]$). Mais aucun effet du

facteur sexe n'est retrouvé ($P = 0,50$). Enfin, on trouve une tendance statistique pour ce qui est de l'interaction Age X Sexe ($P = 0,06$; $\eta^2 = 0,10$).

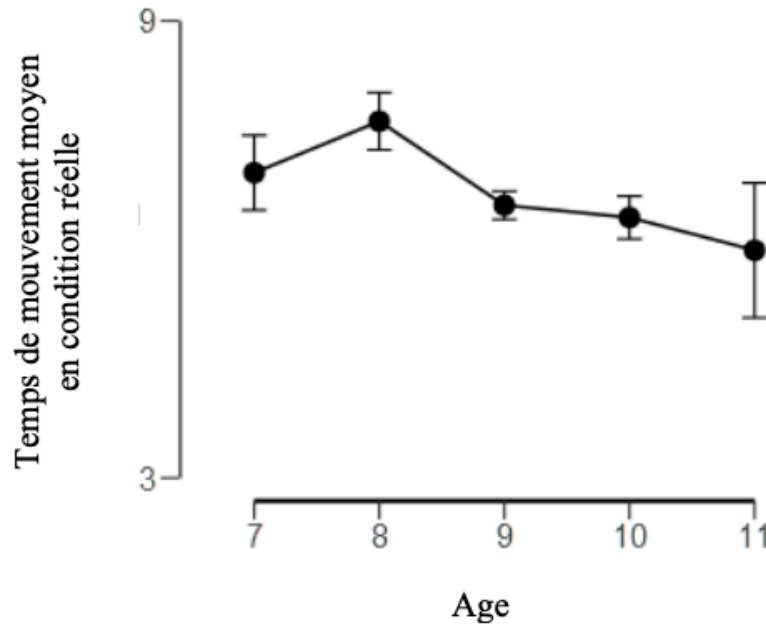


Figure 7 : Temps moyen de mouvement réel en fonction des tranches d'âge. Les barres d'erreurs représentent les erreurs type de la moyenne.

Nous pouvons voir qu'il y a un effet de l'âge sur les performances des enfants. Mais, nous ne pouvons pas savoir quelles tranches d'âge se différencient des autres.

Afin de répondre à cette question, nous avons utilisé des tests *a posteriori* (HSD de Tukey) qui révèlent que c'est la tranche d'âge des 8 ans qui diffère significativement de celle des 10 ans ($P = 0,002$), et que les enfants de 8 ans diffèrent de manière quasi significative des enfants de 9 ans ($P = 0,051$).

3.1.2. Temps de mouvement moyen en condition simulée (IM)

Nous cherchons à savoir s'il y a un effet éventuel de l'âge et du sexe pris ensemble et chacun isolément sur les performances des enfants à la Tâche Radiale de Fitts. La mesure qui est le Temps de mouvement moyen en condition simulée (IM) a fait l'objet d'analyse de variance (ANOVA) selon un plan 5 (Age) X 2 (Sexe).

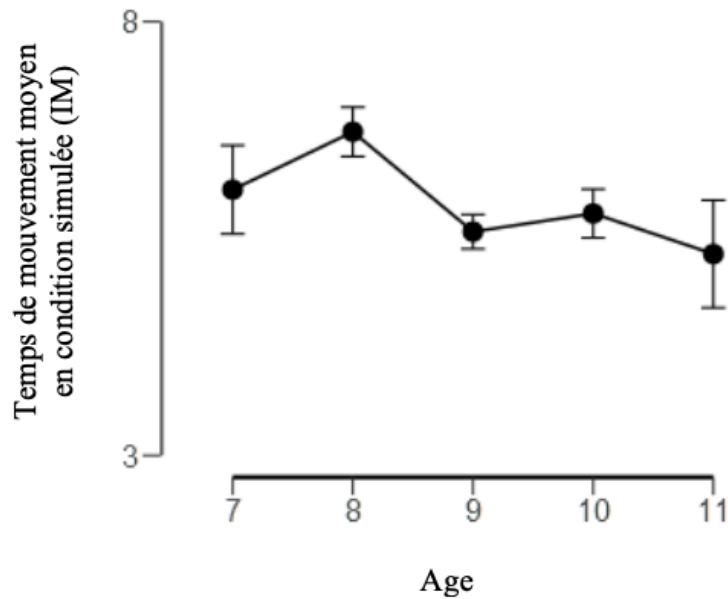


Figure 8 : Temps de mouvement moyen en condition simulée (IM) en fonction de l'âge. Les barres d'erreurs représentent les erreurs type de la moyenne.

L'ANOVA à deux facteurs (Age X Sexe) montre une tendance statistique pour l'effet du facteur Age sur le Temps de mouvement moyen en condition simulée (IM) [$F_{(4,70)} = 2,28$; $P = 0,069$; $\eta^2 = 0,10$]. Cependant, aucun effet du facteur Sexe n'est retrouvé, ni de l'interaction Age X Sexe ($P_s > 0,32$).

Afin de savoir quelle tranche d'âge est différente des autres, nous avons utilisé les tests *a posteriori* de Tukey qui révèlent que seule la tranche d'âge de 8 ans diffère significativement de celle de 9 ans ($P = 0,04$).

3.1.3. Corrélation entre Temps de mouvement moyen en condition réelle et Temps de mouvement en condition simulée (IM)

Afin de vérifier si le Temps de mouvement moyen en condition réelle et le Temps de mouvement moyen en condition simulée (IM) sont liés, un test de corrélation non-paramétrique unidirectionnel (corrélation positive entre les deux variables suspectées sur la base des données de la littérature) a été pratiqué sur les deux mesures. C'est le test de corrélation de Spearman qui a été utilisé. L'utilisation d'un test non-paramétrique a été nécessaire car nous avons observé une distribution non-normale des données dans la quasi-totalité des variables.

La question qui s'est posée ici est de savoir si le Temps de mouvement moyen en condition réelle est lié au temps de mouvement moyen en condition simulée (IM) et de rendre compte de l'évolution similaire possible des deux variables.

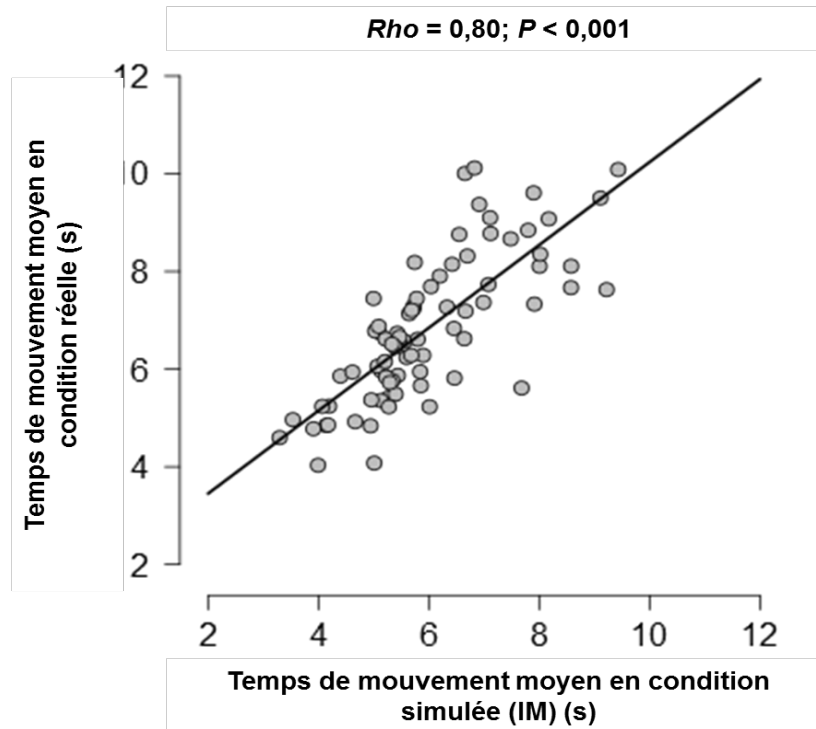


Figure 9 : Nuage de point montrant la corrélation entre les variables : temps de mouvement moyen en condition simulée (IM) et temps de mouvement moyen en condition réelle. Dans cette figure, chacun des points représente la performance d'un enfant (évaluée en secondes) en condition réelle (en ordonnées) et en condition simulée (IM, en abscisses).

Pour la Tâche Radial de Fitts, on observe que le Temps de mouvement moyen en condition réelle et le Temps de mouvement moyen en condition simulée (IM) sont positivement corrélés, avec une force de la corrélation considérée comme élevée ($\rho = 0,80$; $P < 0,001$). Ces deux variables évoluent ensemble (Figure 9).

3.2. Le Test de Jugement de Latéralité Manuelle

3.2.1. Temps de réponse moyen

Nous avons, là aussi, voulu tester l'effet éventuel des facteurs de l'âge et du sexe sur les performances des enfants au Test de Jugement de Latéralité Manuelle. La mesure de Temps de réponse moyen a fait l'objet d'une analyse de variance.

Nous avons à nouveau pratiqué une ANOVA selon le même plan que précédemment, Age (5) X Sexe (2).

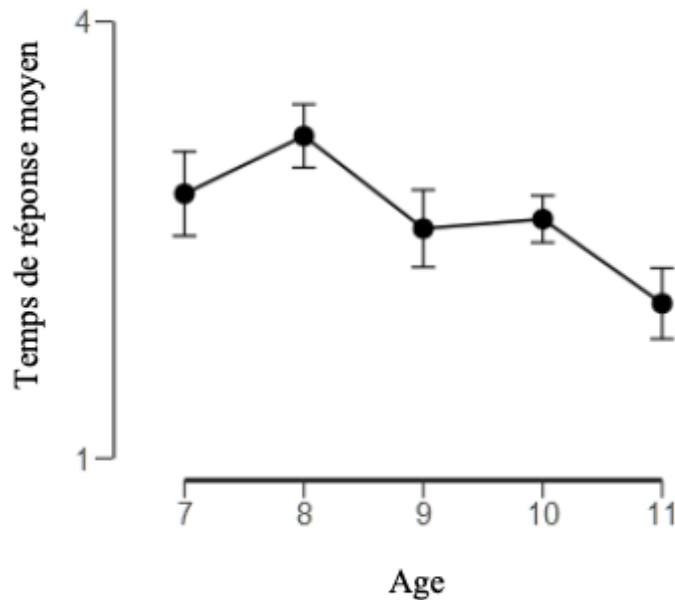


Figure 10 : Temps de réponse moyen en fonction de l'âge. Les barres d'erreurs représentent les erreurs type de la moyenne.

On retrouve une tendance statistique pour ce qui est de l'effet de l'Age sur le temps de réponse moyen [$F_{(4,70)} = 2,16$; $P = 0,08$; $\eta^2 = 0,10$]. Mais aucun effet n'est retrouvé pour le facteur Sexe, ni pour le facteur Age X Sexe de l'enfant ($P_s > 0,18$).

3.2.2. Nombre de bonnes réponses

Afin de tester l'existence éventuelle d'une influence des facteurs Age et Sexe sur les performances des enfants au Test de Jugement de Latéralité Manuelle, la mesure Nombre de bonnes réponses a fait l'objet d'analyse de variance (ANOVA) selon un plan 5 (Age) X 2 (Sexe).

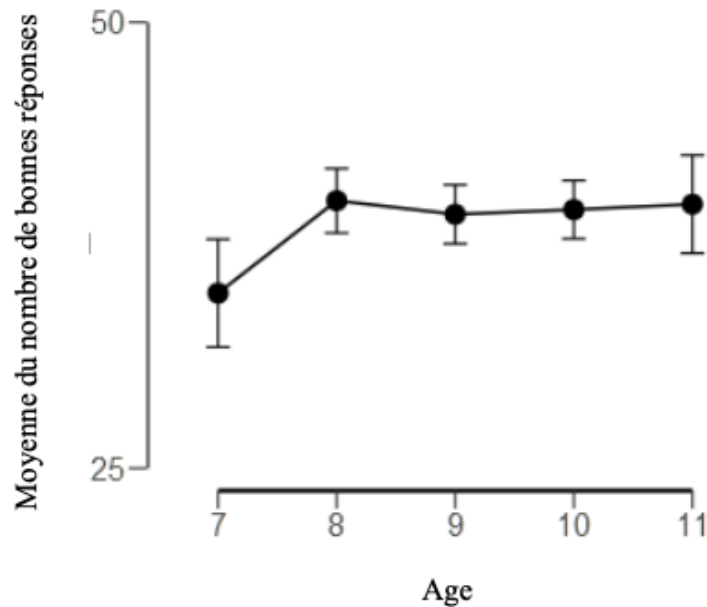


Figure 11 : Moyenne du nombre de bonnes réponses en fonction de l'âge. Les barres d'erreurs représentent les erreurs type de la moyenne.

Les résultats de l'ANOVA et La Figure 11 montrent qu'il n'y a pas d'effet de l'âge et du sexe sur le nombre moyen de bonnes réponses au Test de Jugement de Latéralité Manuelle ($P_s > 0,59$).

3.3. Corrélation entre performances à la Tâche Radiale de Fitts et du subtest Dextérité Manuelle du M- ABC 2

Les différentes variables retenues au préalable (Temps de mouvement moyen en condition réelle, Temps de mouvement moyen en condition simulée (IM), Temps de réponse moyen, Nombre de bonnes réponses et Temps de mouvement moyen au subtest de Dextérité Manuelle du M-ABC 2) vont faire l'objet d'un test de corrélation non-paramétrique entre elles.

Si les tests mesurent bien ce qu'ils sont censés mesurer et si on prend les preuves de corrélation entre les capacités d'imagerie motrice et les coordinations réelles relevées dans la littérature scientifique, nous devrions observer des corrélations entre les variables.

3.3.1. Temps de mouvement moyen en condition réelle et Temps de mouvement moyen du subtest Dextérité Manuelle du M- ABC 2

Afin de vérifier si les performances à la Tâche Radiale de Fitts pour le Temps de mouvement moyen en condition réelle est lié au Temps de mouvement moyen du subtest Dextérité Manuelle

du M-ABC 2, un test de corrélation non-paramétrique (corrélation de Spearman) a été pratiqué sur ces deux variables.

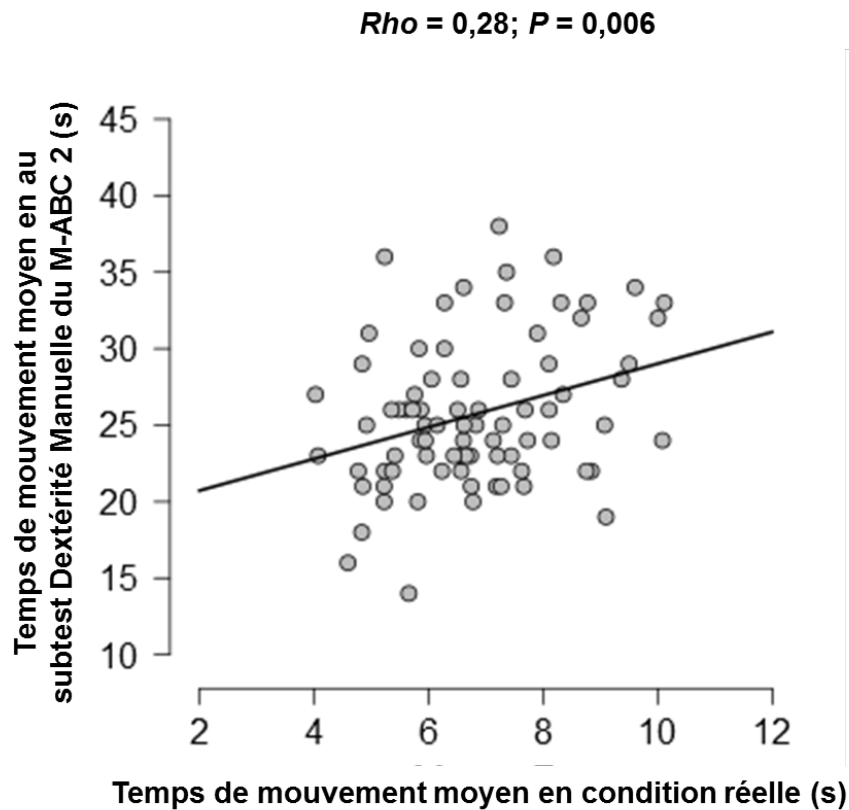


Figure 12 : Nuage de point montrant la corrélation entre le Temps de mouvement moyen en condition réelle à la tâche Radiale de Fitts en fonction du Temps de mouvement moyen au subtest Dextérité manuelle du M- ABC 2.

Pour la Tâche Radiale de Fitts, on observe que le Temps de mouvement moyen en condition réelle et le Temps de mouvement moyen au M-ABC 2 sont positivement corrélés ($rho = 0,28$; $P = 0,006$, Figure 12).

3.3.2. Temps de mouvement moyen en condition simulée (IM) et Temps de mouvement moyen du subtest Dextérité Manuelle du M- ABC 2

Enfin, nous avons cherché à vérifier si le Temps de mouvement moyen en condition simulée (IM) à la Tâche Radiale de Fitts est lié au Temps de mouvement moyen du subtest de Dextérité Manuelle du M- ABC 2. Nous retrouvons une corrélation quasi-significative pour ce qui

concerne le Temps de mouvement moyen en condition simulée (IM) et la moyenne des Temps de mouvement au subtest Dextérité Manuelle ($\rho = 0,18$; $P = 0,056$, Figure 13).

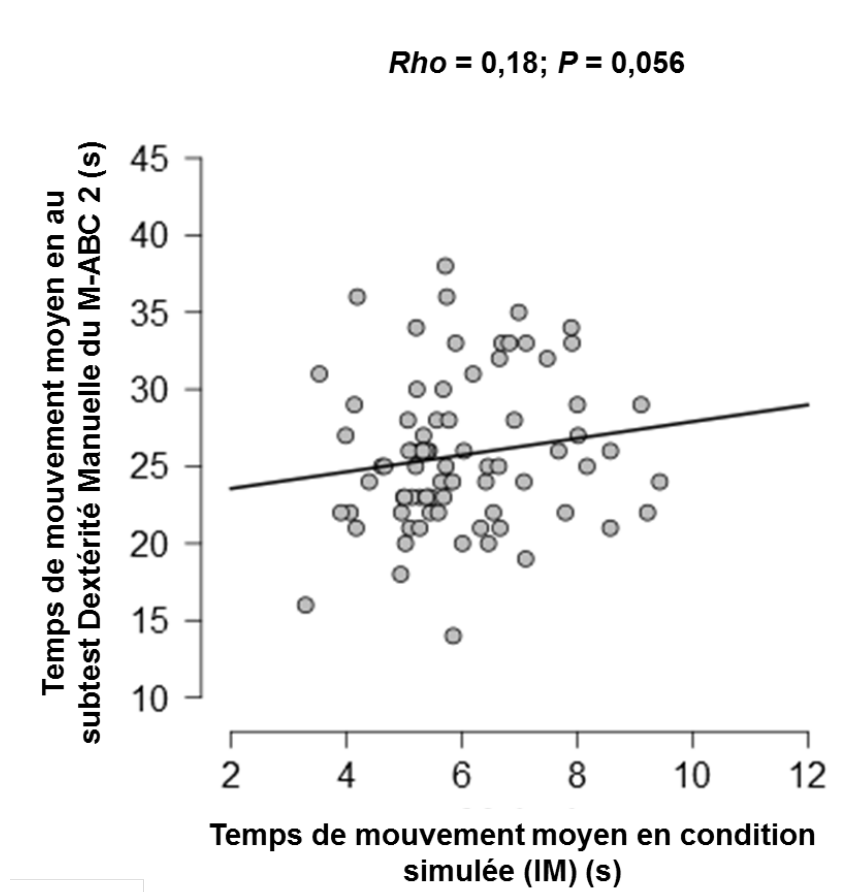


Figure 13: Nuage de point montrant le degré de corrélation entre le temps de mouvement moyen en condition simulée (IM) en fonction du temps de réponse moyen au subtest Dextérité Manuelle.

3.4. Corrélation entre performance au Test de Jugement de Latéralité Manuelle et au subtest Dextérité Manuel du M-ABC 2

3.4.1. Temps de réponse moyen au Test de Jugement de Latéralité Manuelle et Temps de mouvement moyen du subtest Dextérité Manuelle du M-ABC 2

Afin d'observer s'il existe une corrélation entre le Temps de réponse moyen au Test de Jugement de Latéralité Manuelle et le Temps de mouvement moyen au subtest Dextérité Manuelle du M-ABC 2, nous avons réalisé un test de corrélation non-paramétrique (corrélation de Spearman).

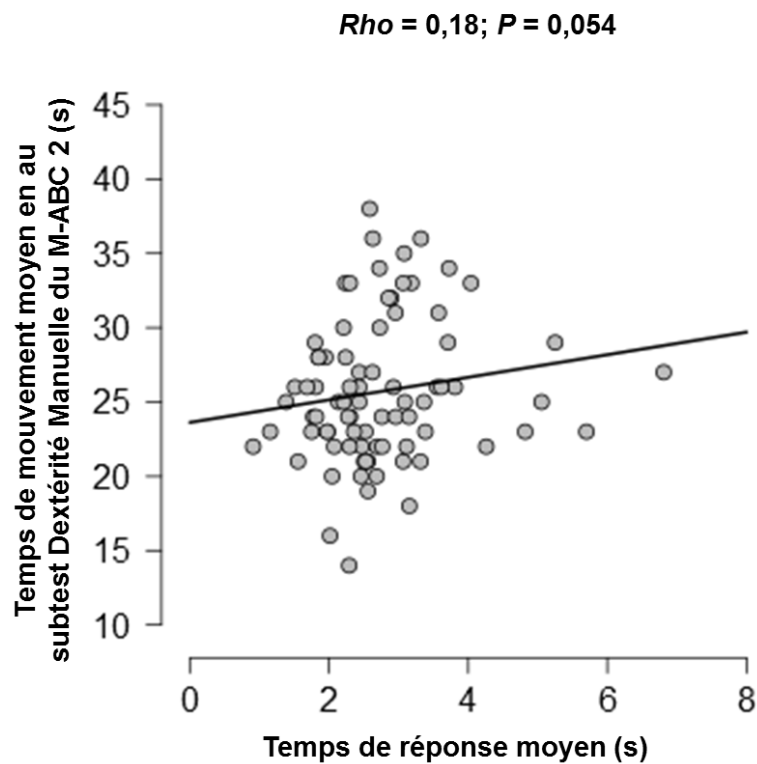


Figure 14 : Temps de mouvement moyen au subtest Dextérité Manuelle en fonction du Temps de réponse moyen.

On observe que le Temps de réponse moyen au Test de Jugement de Latéralité Manuelle et le Temps de mouvement moyen du subtest Dextérité Manuelle du M-ABC 2, sont corrélés de manière quasi-significative ($rho = 0,18$; $P = 0,054$, Figure 14).

3.4.2. Nombre de bonnes réponses au Test de Jugement de Latéralité Manuelle et Temps de mouvement moyen du subtest Dextérité Manuelle du M-ABC 2

Nous avons utilisé la corrélation de Spearman.

On n'observe aucune corrélation entre le nombre de bonnes réponses au Test de Jugement de Latéralité Manuelle et le temps de mouvement moyen du subtest de Dextérité Manuelle du M-ABC 2 ($P = 0,88$).

4. Tableaux récapitulatifs des résultats obtenus

Tableau 3 : Récapitulatif des données obtenues suite à l'analyse de variance (ANOVA) : facteurs âge, sexe, âge X sexe en fonction des différentes variables retenues

	Age	Sexe	Age X Sexe
Temps de mouvement moyen en conditions réelle à la Tâche Radiale de Fitts	Effet significatif Les 8 ans diffèrent des 10 ans Les 8 ans diffèrent de manière quasi significative avec les 9 ans	X	Tendance
Temps de mouvement moyen en condition simulée (IM) à la Tâche Radiale de Fitts	Tendance Les enfants de 8 ans diffèrent significativement des 9 ans	X	X
Nombre de bonnes réponses au Test de Jugement de Latéralité Manuelle	Tendance	X	X
Temps de réponse moyen au Test de Jugement de Latéralité Manuelle	Tendance	X	X
Temps de mouvement du subtest de Dextérité Manuelle du M-ABC 2	X	X	X

Tableau 4 : Récapitulatif du résultat obtenu suite à l'analyse des deux variances de la Tâche Radiale de Fitts

	Temps de mouvement moyen en condition simulée (IM) à la Tâche Radiale de Fitts
Temps de mouvement moyen en condition réelle à la Tâche Radiale de Fitts	Positivement corrélés La force de corrélation est élevée

Tableau 5 : Récapitulatif des données obtenues suite à l'analyse de variance des variables de la Tâche Radiale de Fitts en fonction de la variable Temps de mouvement moyen au subtest Dextérité Manuelle du M- ABC 2

	Temps de mouvement moyen au subtest Dextérité Manuelle du M- ABC 2
Temps de mouvement moyen en condition réelle à la Tâche Radiale de Fitts	Positivement corrélés La corrélation est modérée
Temps de mouvement moyen en condition simulée (IM) à la Tâche Radiale de Fitts	Tendance statistique
Temps de réponse moyen au Test de Jugement de Latéralité Manuelle	Tendance statique La corrélation est quasi-significative
Nombre de bonnes réponses au Test de Jugement de Latéralité Manuelle	X

IV. Discussion

Cette étude préliminaire à l'étalonnage des deux tests d'imagerie motrice qui sont la Tâche Radiale de Fitts et le Test de Jugement de Latéralité Manuelle a été réalisée pour tester la sensibilité de chacun des tests, notamment en regard des effets de l'âge et du sexe sur les performances des enfants aux tests d'IM. De plus, les relations entre capacités d'IM et coordinations manuelles (évaluées au travers de la tâche de dextérité manuelle du M-ABC 2) ont été testées.

Dans un premier temps, nous présenterons les résultats concernant l'effet des facteurs Age et Sexe sur les différentes variables établis à partir de la Tâche Radiale de Fitts et du Test de Jugement de Latéralité Manuelle. Dans cet étalonnage nous avons choisi l'âge, le sexe pour étudier les performances des enfants. On observe qu'il n'y a aucun effet du sexe, seul, sur les autres variables. Cela veut dire que le sujet sera tout aussi performant qu'un autre, qu'il soit un garçon ou une fille, à la Tâche Radiale de Fitts et au Test de Jugement de Latéralité Manuelle.

Cependant, on retrouve des effets significatifs et des tendances si on considère le facteur âge. En effet, concernant le Temps de mouvement moyen en condition réelle à la Tâche Radiale de Fitts en fonction de l'âge, l'analyse de variance montre un effet significatif. La performance des sujets de 8 ans diffère significativement des performances des enfants de 10 ans et diffère de manière quasi significative avec les enfants de 9 ans en condition réelle. Ensuite, la performance des sujets de 8 ans au Temps de réponse moyen en condition simulée (IM) diffère aussi significativement de la performance des enfants de 9 ans. En l'occurrence, on peut dire qu'en condition réelle et simulée, les enfants de 8 ans sont plus lents que les enfants des âges supérieurs. Ceci est cohérent avec les résultats trouvés par Smits-Engelsman & Wilson (2013). Dans leur étude, ils ont utilisé le C-VRFT sur une population allant de 5 à 29 ans. Bien que les variables qu'ils aient utilisées soient différentes des nôtres, on retrouve une différence significativement inférieure entre le groupe des 5 – 7 ans et le groupe des 8 - 10 ans par rapport à celle des autres groupes ; ce constat suggère qu'il y a une amélioration importante dans la relation temporelle entre le mouvement exécuté réellement et le mouvement simulé (IM). Ces résultats corroborent l'étude de Skoura, Vinter & Papaxanthis (2009) et l'étude de Caeyenberghs *et al.*, (2009) qui ont utilisé la tâche C-VRFT. Ils montrent un effet significatif entre le Temps de mouvement exécuté et simulé (IM) sur les différentes largeurs de cibles en fonction de l'âge. Par ailleurs, Smits-Engelsman & Wilson (2013) observent également que les

enfants deviennent plus rapides avec l'âge tant dans les mouvements réels que simulés, cela va dans le sens des résultats que nous avons obtenus entre les âges de 8, 9 et 10 ans. Aux vus de ces constats, on peut supposer qu'il se déroule un phénomène développemental à partir de 8 ans, qui semble améliorer la qualité des capacités d'imagerie motrice. Il est possible que cet événement soit corrélé avec la maturation cérébrale, car la capacité à se représenter une action suit le développement du cortex pariétal et du cortex préfrontal qui semblent devenir matures vers l'âge de 10 ans d'après Gabbard & Bobbio (2011). Mais aussi, que le développement de la capacité à simuler une action peut suivre le développement des habiletés motrices (Caeyenberghs, Tsoupas, Wilson & Smits-Engelsman, 2009). Pour finir, la période charnière entre 7 et 10 ans, observée par plusieurs auteurs durant laquelle l'enfant devient capable d'utiliser un contrôle prédictif du mouvement pourrait influencer positivement les performances des sujets à la Tâche Radiale de Fitts.

Par ailleurs, nous nous sommes posés la question de savoir si le Temps de mouvement moyen en condition réelle évoluait de la même manière que le Temps de mouvement moyen en conditions simulée (IM) dans la Tâche Radiale de Fitts. Si nous trouvons une corrélation, cela veut dire que ce que nous mesurons en imagination partage des points communs avec le mouvement réel, et que la Tâche Radiale de Fitts mesure bien ce qu'elle est censée mesurer, à savoir : le fait que les actions imaginées préservent les caractéristiques temporelles de l'action exécutée (Decety, Jeannerod, & Prablanc, 1989 ; Smits-Engelsman & Wilson, 2013).

Nos résultats montrent une corrélation positive considérée comme forte entre le Temps de mouvement moyen en condition réelle et le Temps de mouvement moyen en condition simulée (IM). La *Figure 9* décrit bien ce constat, plus un enfant est lent en condition réelle, plus il est également lent en condition simulée (IM) à la Tâche Radiale de Fitts et l'inverse est aussi observé. Cependant, on ne sait pas pourquoi ces deux variables évoluent ensemble. Ce constat est pleinement cohérent avec l'étude de Smits-Engelsman & Wilson (2013). La force de la corrélation retrouvée entre le mouvement exécuté et le mouvement imaginé est très proche ($r_{ho} = 0,70$), pour le groupe des enfants âgé de 11 à 13 ans, de notre résultat. Elle est aussi très proche de ce qui est trouvé dans l'étude de Ferguson *et al.*, (2015) qui démontrent un effet significatif positif entre le Temps de mouvement moyen en réel et en imagination pour le C-VRFT.

Nos résultats vont dans le sens de ce qui est cité dans la littérature, la Tâche Radiale de Fitts que nous avons commencé à étalonner capte bien le phénomène de chronométrie mentale attendu. La force de corrélation rend compte d'une isochronie entre les performances réelles et simulées. Le phénomène de chronométrie mentale a été défini par Jeannerod (1995), il repose sur l'idée que les actions simulées prennent le même temps que celle exécutée et donc que l'action simulée est rendue possible par le processus d'imagerie motrice.

On peut donc émettre l'hypothèse que l'action simulée est possible grâce à la capacité d'imagerie motrice. Lorsqu'on utilise le processus d'imagerie motrice, les mécanismes cérébraux (dans leurs grandes lignes) sont les mêmes que ceux activés lors d'un mouvement réel. En effet, au niveau neuroanatomique, il existerait une congruence d'activation des zones corticales et sous-corticales pour le processus d'imagerie motrice et l'exécution réelle. Seulement, lorsque le mouvement est simulé, une voie inhibitrice directe entre le cortex pariétal et le cortex moteur primaire empêcherait l'information d'arriver jusqu'aux effecteurs (Lebon, Lotze, Stinear & Byblow, 2012). Néanmoins, la limite de nos résultats par rapport à l'étude de Smits-Engelsman & Wilson (2013), est que dans nos variables Temps de mouvement moyen en condition réelle et en condition simulée (IM) nous y avons intégré les performances de tous les sujets de l'échantillonnage sans tenir compte du facteur âge ni des indices de difficulté. La courbe de régression obtenue pourrait s'expliquer par l'idée que les sujets montrant une grande variabilité (les points les plus éloignées de la droite) sont les plus jeunes et que les points les plus proches de la droite sont les sujets plus âgés car ils sont plus précis.

Pour continuer, nous allons discuter la sensibilité du Test de Jugement de Latéralité Manuelle par rapport à l'âge des sujets. Nos résultats indiquent seulement des tendances concernant le Temps moyen de réponse et le Nombre de bonnes réponses en fonction de l'âge des enfants, mais il n'y a pas de différence de performance significativement entre les âges. D'après, la *Figure 10* on peut observer que le Temps de réponse a tout de même tendance à être de plus en plus court avec l'avancée en âge. Ensuite, l'âge, le sexe et l'interaction de ces deux facteurs n'influencent pas le nombre de bonnes réponses au Test de Jugement de Latéralité Manuelle.

De leur côté Caeyenberghs, Tsouspas, Wilson & Smits-Engelsman (2009), montrent que dans la tâche de jugement de latéralité des mains, les enfants les plus jeunes présentent des scores d'identification inférieurs à ceux des 11 - 12 ans ; les enfants de 12 ans ont plus de facilité à

réaliser des rotations mentales. Dans leur méta-analyse, Barhoun *et al.*, (2019) relèvent que les enfants typiques sont plus rapides, ont une précision accrue et une plus grande moyenne IES (*Mean Inverse Efficiency* : temps de réponse/nombre de bonnes réponses) pour les rotations médiales par rapport aux rotations latérales. Si on reprend le paradigme de Jugement d'action, celui-ci nous dit que le temps de réaction est supposé refléter le temps nécessaire pour simuler implicitement les mouvements de rotation de la cible présentée. On peut dire que les résultats montrés par Barhoun *et al.*, (2019) sont compatibles avec ce paradigme et donc que le Test de Jugement de Latéralité Manuelle rend bien compte du processus d'Imagerie motrice. De plus, dans cette méta-analyse a été développé un indice IES qui rend compte du temps de réponse et de la précision dans une seule métrique, pour fournir une mesure plus sensible de la performance au Test de Jugement de Latéralité que les deux variables isolément. Ceci est une piste à approfondir dans les prochaines analyses en lien avec l'étalonnage de ce test.

Ainsi, nos résultats ne corroborent que partiellement ce qui est observé dans la littérature. En effet, nous ne retrouvons pas significativement de différence dans les scores entre les enfants plus jeunes et les enfants plus âgés mais il est constaté que le temps de réponse moyen diminue avec l'avancée en âge ; ce qui peut nous permettre de supposer que le Test de Jugement de Latéralité Manuelle rend compte d'un aspect développemental. Il serait donc nécessaire pour augmenter la sensibilité du test vis-à-vis de l'âge des sujets, d'augmenter le nombre total de participants, tout en augmentant plus spécifiquement les effectifs pour les tranches d'âge 7 ans et 11 ans. A terme, continuer l'étalonnage permettra d'augmenter la puissance du Test de Jugement de Latéralité Manuelle, c'est-à-dire, sa capacité à distinguer les performances des sujets en regard de l'avancée en âge.

La puissance statistique d'un test est la probabilité de rejeter l'hypothèse nulle ou autrement dit, elle exprime la probabilité de détecter une différence lorsqu'elle existe vraiment.

Pour être satisfaisante, la puissance doit au moins être égale à 0,80.

Au contraire, il se peut aussi que le Test de Jugement de Latéralité Manuelle soit mal conçu et qu'il ne soit (ni ne sera) pas suffisamment sensible pour mesurer la dimension spatiale des capacités d'imagerie motrice. Cependant, cette hypothèse peut être démentie car plusieurs études, l'ont utilisé pour différencier des enfants typiques d'enfants porteurs de TDC (Williams *et al.*, 2006, Williams *et al.*, 2008, Williams *et al.*, 2013 ; Deconinck *et al.*, 2009 ; Reynolds *et*

al., 2015 ; Fuelscher *et al.* 2016 ; Noten *et al.*, 2014 ; Adams *et al.*, 2017). Enfin, une autre hypothèse expliquant le fait que le test n'est pas réellement sensible au facteur âge en l'état, repose sur le manque de précision des variables prises isolément. Concernant la variable Nombre de bonnes réponses, on peut observer un phénomène de plafond vers l'âge de 8 - 9 ans jusqu'à 11 ans, ce même phénomène est aussi retrouvé dans les études de Williams *et al.*, (2008) et de Fuelscher *et al.*, (2016). Si, on crée un indice qui rend compte de la quantité de bonnes réponses en fonction du temps de réponse moyen, comme l'ont fait Barhoun *et al.*, (2019), on pourra peut-être obtenir des différences entre les performances sur le plan statistique.

Pour finir, nous avons étudié les différentes variables établies pour la Tâche Radiale de Fitts et le Test de Jugement de Latéralité Manuelle avec la variable du Temps de mouvement moyen au subtest Dextérité Manuelle du M- ABC 2. Dans, ce paragraphe, nous allons essayer de démontrer que les capacités motrices des enfants vont de pair avec les coordinations motrices réalisées en condition d'imagerie motrice afin de rendre compte de l'utilité de ces deux tests d'imagerie motrice dans le domaine de la psychomotricité.

Nos résultats prouvent qu'il existe une corrélation significative entre le Temps de mouvement moyen en condition réelle à la Tâche Radiale de Fitts en fonction du Temps de mouvement moyen au subtest Dextérité Manuelle du M- ABC 2. Ce constat permet de dire qu'il existe un lien entre deux coordinations manuelles, en dépit du fait que les tâches ne soient pas les mêmes. Un processus communs sous-jacents à ces coordinations manuelles est probablement responsable de ce constat. Ensuite, on obtient des tendances statistiques pour les deux tâches d'imagerie motrice (Temps de mouvement moyen en condition simulée (IM) à la Tâche Radiale de Fitts et Temps de réponse moyen au Test de Jugement de Latéralité Manuelle) avec le Temps de mouvement moyen au subtest Dextérité Manuelle du M- ABC 2. Il est donc possible d'émettre l'hypothèse de l'existence probable d'un lien entre l'exécution réelle de coordination manuelle et l'exécution de coordination manuelle en imagerie motrice pour des tâches différentes. Dans la littérature, Funk, Brugger & Wilkening (2005) ont souligné l'existence d'une corrélation entre activité motrice et la capacité d'IM pour des enfants. Bien que la procédure utilisée pour le Test de Jugement de Latéralité ne soit pas la même, ils ont observé une congruence posturale, les enfants répondaient plus vite lorsque leurs mains étaient dans la même position que celles des mains présentées.

Ainsi, on peut supposer que la Tâche Radiale de Fitts et le Test de Jugement de Latéralité Manuelle mesurent très probablement les capacités d'imagerie motrice et qu'ils peuvent aider à rendre compte de l'intégrité des processus d'IM qui sont liés à la qualité des coordinations motrices réelles d'un sujet. L'exécution réelle ou simulée (IM) d'un mouvement pourrait être donc sous-tendue par un processus commun situé probablement à un niveau cérébral, et qui serait responsable de la qualité du contrôle moteur. Ce mécanisme pourrait être en lien avec les modèles internes inverse et prédictif de l'action. Enfin, les résultats obtenus sur la Tâche Radiale de Fitts et le Test de Jugement de Latéralité pour démontrer la corrélation entre habileté motrice de l'enfant et capacité d'imagerie motrice ont été très peu étudiés dans la littérature scientifique. Cet aspect, serait à approfondir et il serait pertinent de répliquer les résultats pour confirmer le constat effectué ici.

Conclusion de la discussion

- Des effets de l'âge ont été observés sur les performances à la Tâche Radiale de Fitts, mais il est nécessaire de continuer l'étalonnage pour augmenter la puissance du test et tenter d'améliorer la sensibilité de l'outil.
- Les deux tests prouvent aussi que la capacité d'imagerie motrice s'améliore avec l'avancée en âge des enfants. Ils supposent donc que l'IM suit une allure développement.
- La force de la corrélation retrouvée entre le Temps de mouvement moyen en condition réelle et en condition simulée montre que la Tâche Radiale de Fitts rend compte de l'isochronie temporelle entre mouvement exécuté et mouvement simulé.
- La corrélation modérée pour le Temps de mouvement moyen à la condition réelle et les tendances pour les conditions imaginées de la Tâche Radiale de Fitts et du Test de Jugement de Latéralité Manuelle en fonction du Temps de mouvement moyen au subtest Dextérité Manuelle du M-ABC 2 montrent qu'il existe probablement des mécanismes partagés sous-jacents pour l'action réelle et imaginée.
- Les tendances de corrélation retrouvées pour les conditions imaginées de la Tâche Radiale de Fitts et du Test de Jugement de Latéralité Manuelle peuvent permettre de conjecturer que les deux tâches d'imagerie motrice ont empruntées les mêmes circuits cérébraux.
- Compte-tenu des données de la littérature et de nos résultats, il est possible de dire que l'imagerie motrice et le mouvement intentionnel exécuté font partie d'un continuum et donc que l'imagerie motrice peut rendre compte, au moins partiellement, de la qualité des coordinations motrices réelles d'un individu.
- On peut donc penser qu'en étudiant les capacités d'IM au travers de la Tâche Radiale de Fitts et du Test de Jugement de Latéralité Manuelle, on mesure un processus en lien avec la qualité du contrôle moteur.

Conclusion générale

D'après les théories des sciences cognitives et neuro-computationnelles, l'intégrité des modèles internes inverse et prédictif sous-tendraient la qualité du contrôle moteur. Comme nous avons pu le démontrer dans cet écrit, une altération de ces modèles pourrait être une explication du déficit moteur chez les enfants porteurs de TDC. Ce déficit s'exprimerait lors de l'acquisition des mouvements, mais aussi pour modifier l'exécution de mouvement. Par ailleurs, l'imagerie motrice qui consiste à simuler un mouvement sans l'exécuter, peut rendre compte de la capacité d'un sujet à générer des modèles internes de l'action. Ainsi, dans le domaine de la recherche, l'imagerie motrice a été étudiée pour témoigner de l'intégrité des modèles internes grâce aux paradigmes de chronométrie mentale et de jugement d'action.

A partir de là, des outils rendant compte de la capacité d'imagerie motrice ont été développés, mais sont restés cantonnés aux recherches de laboratoire. Ils ont montré leur intérêt d'utilisation et d'évaluation. En effet, ils peuvent différencier un sujet contrôle d'un sujet TDC. Néanmoins, en France, il n'existe pas de données sur un éventuel début d'étalonnage, ou qui étudient la sensibilité de ces tests. Donc, nous avons entrepris l'étalonnage des deux tests d'imagerie motrice les plus utilisés dans le domaine scientifique. Il s'agit de la Tâche Radiale de Fitts qui a été adaptée en format papier-crayon et du Test de Jugement de Latéralité Manuelle. A terme, dans le cas d'une suspicion de TDC, ils pourront être utilisés par les psychomotriciens pour situer, à la suite de l'évaluation de l'écriture et des coordinations manuelles, plus en détails les difficultés présentées par l'enfant et rendre compte de son profil global. Le psychomotricien pourra donc axer sa prise en charge plus spécifiquement.

Dans cet écrit, nous avons démontré un début de sensibilité de ces deux tests mesurant la capacité d'imagerie motrice ainsi qu'un *continuum fonctionnel* entre la qualité des habiletés motrices réelles et la qualité de simulation d'un mouvement par imagerie motrice. Cependant, les résultats montrent des limites qui peuvent s'expliquer par un échantillonnage trop faible pour certaines tranches d'âge comme les 11 ans et les 7 ans. Cela ne permet donc pas de rendre compte des différences de performances attendues. Il est donc nécessaire de continuer les passations pour augmenter la puissance des tests quant à leur capacité à discriminer les performances des sujets en regard de l'âge.

Ainsi, d'autres étudiants vont poursuivre ce projet d'étalonnage prochainement. De plus, des retests vont bientôt être effectués pour vérifier la fidélité test-retest de la Tâche Radiale de Fitts et du Test de Jugement de Latéralité Manuelle dans la région de Marseille.

Pour conclure, l'imagerie motrice est un concept novateur mais qui a déjà montré son intérêt dans le domaine de la psychomotricité pour la prise en charge d'enfant TDC. En effet, des approches rééducatives basées sur l'imagerie motrice (e.g., Puyjarinet, 2019 ; Wilson *et al.*, 2002, 2016) ont déjà démontré leur efficacité. Elle consiste, d'abord à choisir une activité motrice à travailler. Ensuite, une séance se déroule dans l'ordre suivant : un entraînement au timing prédictif, une relaxation et une préparation mentale, l'observation d'une vidéo d'un modèle opérant, une visualisation en IM suivie d'une répétition mentale et enfin l'alternance avec la pratique réelle. Puyjarinet (2019) a proposé un protocole de rééducation basé sur l'imagerie motrice dans le cas d'une dysgraphie. Les résultats montrent une efficacité similaire à une rééducation métacognitive et une progression du groupe d'IM plus importante que le groupe contrôle (sans traitement). Pour conclure, l'imagerie motrice est un concept qu'il est encore nécessaire d'approfondir et de développer dans le domaine de la psychomotricité. Un des moyens permettant de développer ce domaine consiste à étalonner des épreuves d'IM. Nous avons tenté de contribuer à l'atteinte de cet objectif au travers de ce mémoire.

Bibliographie

- Adams, I. L., 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.
- Albaret, J.M. (2013). Les troubles psychomoteurs aujourd'hui : entre Ajuriaguerra et la théorie des systèmes dynamiques. *Développements*, *14*(1), 4.
- Albaret, J. M., & De Castelneau, P. (2005). Démarches diagnostiques pour le Trouble de l'Acquisition de la Coordination (TAC). *Le Trouble de l'Acquisition de la Coordination. Evaluation et rééducation de la maladresse chez l'enfant*, 29-85.
- Barhoun, P., Fuelscher, I., Kothe, E. J., He, J. L., Youssef, G. J., Enticott, P. G., ... Hyde, C. (2019a). Motor imagery in children with DCD: A systematic and meta-analytic review of hand-rotation task performance. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *99*, 282–297.
- Blais, M. (2018). Apprentissage procédural moteur et mémoire procédurale dans le Trouble Développementale de la Coordination : études comportementales, en ElectroEncéphaloGraphie et en Imagerie par Résonance Magnétique (Doctoral dissertation). Université Toulouse 3 Paul Sabatier, Toulouse.
- Blank, R., Smits-Engelsman, B., Polatajko, H., & Wilson, P. (2012). European Academy for Childhood Disability (EACD): Recommendations on the definition, diagnosis and intervention of developmental coordination disorder (long version)*. *Developmental Medicine & Child Neurology*, *54*(1), 54–93.
- Caeyenberghs, K., Tsoupas, J., Wilson, P. H., & Smits-Engelsman, B. C. M. (2009). Motor Imagery Development in Primary School Children. *Developmental Neuropsychology*, *34*(1), 103–121.
- Caeyenberghs, K., Wilson, P. H., Van Roon, D., Swinnen, S. P., & Smits-Engelsman, B. C. (2009). Increasing convergence between imagined and executed movement across development:

evidence for the emergence of movement representations. *Developmental science*, 12(3), 474-483.

Cairney, J., Hay, J. A., Faught, B. E., & Hawes, R. (2005). Developmental coordination disorder and overweight and obesity in children aged 9–14 y. *International Journal of Obesity*, 29(4), 369–372.

Chambaron, S., Berberian, B., Ginhac, D., Delbecque, L., & Cleeremans, A. (2010). Action, observation et imagerie mentale d'une action : peut-on apprendre implicitement dans tous les cas ? *L'Année psychologique*, 110(3), 351–364.

Chen, H. F., & Cohn, E. S. (2003). Social participation for children with developmental coordination disorder : conceptual, evaluation and intervention considerations. *Physical & occupational therapy in pediatrics*, 23(4), 61-78.

Cohen, J. (1988). Statistical power analysis for the behaviors science. (2nd). *New Jersey: Laurence Erlbaum Associates, Publishers, Hillsdale.*

Costini, O., Roy, A., Faure, S., & Gall, D. L. (2013). La dyspraxie développementale : actualités et enjeux. *Revue de neuropsychologie*, 5(3), 200–212.

Decety, J., & Jeannerod, M. (1995). Mentally simulated movements in virtual reality: does Fitt's law hold in motor imagery?. *Behavioural brain research*, 72(1-2), 127-134.

Decety, J., Jeannerod, M., & Prablanc, C. (1989). The timing of mentally represented actions. *Behavioural brain research*, 34(1-2), 35-42.

Deconinck, F. J. A., Spitaels L., Fias, W., & Lenoir, M. (2009). Is developmental coordination disorder a motor imagery deficit? *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 31(6), 720-730.

Feltz, D. L., & Landers, D. M. (1983). The effects of mental practice on motor skill learning and performance: A meta-analysis. *Journal of Sport Psychology*, 5, 25-57.

- Ferguson, G. D., Wilson, P. H., & Smits-Engelsman, B. C. M. (2015). The influence of task paradigm on motor imagery ability in children with developmental coordination disorder. *Human movement science, 44*, 81-90.
- Frith C. D., Blakemore S. J., & Wolpert D. M. (2000). Abnormalities in the awareness and control of action. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences, 355*(1404), 1771–1788.
- Fuelscher, I., Williams, J., Wilmut, K., Enticott, P. G., & Hyde, C. (2016). Modeling the Maturation of Grip Selection Planning and Action Representation: Insights from Typical and Atypical Motor Development. *Frontiers in Psychology, 7*(108).
- Funk M., Brugger P., Wilkening F. (2005). Motor processes in children's imagery: the case of mental rotation of hands. *Developmental Science, 8*(5), 402-408.
- Gabbard, C., & Bobbio, T. (2011). The Inability To Mentally Represent Action May Be Associated With Performance Deficits in Children With Developmental Coordination Disorder. *International Journal of Neuroscience, 121*(3), 113–120.
- Geuze, R. H. (2003). Static balance and developmental coordination disorder. *Human movement science, 22*(4-5), 527-548.
- Geuze, R. H. (2005). Le Trouble de l'Acquisition de la Coordination. *Évaluation et rééducation de la maladresse chez l'enfant*. Marseille : Solal
- Gubbay, S. S. (1975). Clumsy children in normal schools. *Medical Journal of Australia, 1*(8), 233-236.
- Guilbert, J., Jouen, F., Lehalle, H., & Molina, M. (2013). Imagerie motrice interne et simulation de l'action chez l'enfant. *L'Année psychologique, 113*(3), 459–488.
- Guillot, A., & Collet, C. (2008). Construction of the Motor Imagery Integrative Model in Sport: a review and theoretical investigation of motor imagery use. *International Review of Sport and Exercise Psychology, 1*(1), 31–44.

- Guillot, A., Louis, M., & Collet, C. (2010). Neurophysiological substrates of motor imagery ability. *The neurophysiological foundations of mental and motor imagery*, 109-124.
- Hadders-Algra, M. (2002). Two distinct forms of minor neurological dysfunction: Perspectives emerging from a review of data of the Groningen Perinatal Project. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 44(8), 561-571.
- 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.
- Jackson, P. L., Lafleur, M. F., Malouin, F., Richards, C., & Doyon, J. (2001). Potential role of mental practice using motor imagery in neurologic rehabilitation. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 82(8), 1133-1141.
- Jeannerod, M. (1994). The representing brain: Neural correlates of motor intention and imagery. *Behavioral and Brain Sciences*, 17(02), 187-245.
- Jeannerod, M. (1995). Mental imagery in the motor context. *Neuropsychologia*, 33(11), 1419–1432.
- Jeannerod, M., (2001). Neural Simulation of Action: A Unifying Mechanism for Motor Cognition. *NeuroImage*, 14, 103-109.
- Jeannerod, M., (2003). The mechanism of self-recognition in humans. *Behavioural Brain Research*, 142, 1–15.
- Jeannerod, M., & Decety, J. (1995). Mental motor imagery: a window into the representational stages of action. *Current Opinion in Neurobiology*, 5(6), 727–732.
- 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.

- Kaplan, B. J., N. Wilson, B., Dewey, D., & Crawford, S. G. (1998). DCD may not be a discrete disorder. *Human Movement Science, 17*(4–5), 471–490.
- 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.
- 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.
- Knuckey, N. W., & Gubbay, S. S. (1983). Clumsy children: a prognostic study. *Journal of Paediatrics and Child Health, 19*(1), 9-13.
- Lacourse, M. G., Orr, E. L. R., Cramer, S. C., & Cohen, M. J. (2005). Brain activation during execution and motor imagery of novel and skilled sequential hand movements. *NeuroImage, 27*(3), 505–519.
- Lacourse, M. G., Turner, J. A., Randolph-Orr, E., Schandler, S. L., & Cohen, M. J. (2004). Cerebral and cerebellar sensorimotor plasticity following motor imagery-based mental practice of a sequential movement. *The Journal of Rehabilitation Research and Development, 41*(4), 505-524.
- Lebon, F., Gueugneau, N., & Papaxanthis, C. (2013). Modèles internes et imagerie motrice. *Movement & Sport Sciences - Science & Motricité, 82*, 51–61.
- Lebon, F., Lotze, M., Stinear, C. M., & Byblow, W. D. (2012). Task-dependent interaction between parietal and contralateral primary motor cortex during explicit versus implicit motor imagery. *PLoS One, 7*(5).
- Lewis, M., Vance, A., Marruff, P., Wilson, P., & Cairney, S. (2008). Differences in motor imagery between children with developmental coordination disorder with and without the combined type of ADHD. *Development Medicine & Child Neurology, 50*, 608-612.

- Lotze, M., & Halsband, U. (2006). Motor imagery. *Journal of Physiology – Paris*, 99(4-6), 386-395.
- Lundy-Ekman, L., Ivry, R., Keele, S., & Woollacott, M. (1991). Timing and force control deficits in clumsy children. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 3(4), 367-376.
- Magnat, J., Xavier, J., Zammouri, I., & Cohen, D. (2015). Troubles développementaux de la coordination (TDC) : perspective clinique et synthèse de l'état des connaissances. *Neuropsychiatrie de l'Enfance et de l'Adolescence*, 63(7), 446–456.
- Mathon, B. (2013). Les neurones miroirs : de l'anatomie aux implications physiopathologiques et thérapeutiques. *Revue Neurologique*, 169(4), 285-290.
- Martin, K. A., Moritz, S. E., & Hall, C. R. (1999). Imagery use in sport: A literature review and applied model. *The sport psychologist*, 13(3), 245-268.
- Maruff, P., Wilson, P., Trebilcock, M., & Currie, J. (1999). Abnormalities of imagined motor sequences in children with developmental coordination disorder. *Neuropsychologia*, 37, 1317-1324.
- Mulder, Th. (2007). Motor imagery and action observation: cognitive tools for rehabilitation. *Journal of Neural Transmission*, 114(10), 1265–1278.
- Nunnally, J. C. (1994). Bernstein. IH (1994). *Psychometric theory*, 3.
- Puyjarinet, F. (2015). Intérêt de l'imagerie motrice dans la rééducation de la dysgraphie chez l'enfant. *Entretiens de Psychomotricité*.
- Puyjarinet F. (2019). Intérêt de la pratique de l'imagerie motrice dans la rééducation de l'écriture des enfants dysgraphiques. *A.N.A.E.*, 159, 001-011
- Remigereau, C., Roy, A., Costini, O., Baumard, J., & Gall, D. L. (2017). L'utilisation d'outils chez l'enfant : approche épistémologique et sémiologie clinique dans le trouble développemental de la coordination. *Revue de neuropsychologie*, 9(2), 124–136.

- Sirigu, A., & Duhamel, J. R. (2001). Motor and visual imagery as two complementary but neurally dissociable mental processes. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *13*(7), 910-919.
- Skoura, X., Vinter, A., & Papaxanthis, C. (2009). Mentally simulated motor actions in children. *Developmental Neuropsychology*, *34*(3), 356-367.
- Spruijt, S., Jongsma, M. L., van der Kamp, J., & Steenbergen, B. (2015). Predictive models to determine imagery strategies employed by children to judge hand laterality. *PloS one*, *10*(5), e0126568.
- Vaivre-Douret, L., Lalanne, C., Cabrol, D., Ingster-Moati, I., Falissard, B., & Golse, B. (2011). Identification de critères diagnostiques des sous-types de troubles de l'acquisition de la coordination (TAC) ou dyspraxie développementale. *Neuropsychiatrie de l'Enfance et de l'Adolescence*, *59*(8), 443-453.
- Vingerhoets, G., De Lange, F. P., Vandemaele, P., Deblaere, K., & Achten, E. (2002). Motor imagery in mental rotation: an fMRI study. *Neuroimage*, *17*(3), 1623-1633.
- Visser, J. (2003). Developmental coordination disorder : a review of research on subtypes and comorbidities. *Human Movement Science*, *22*(4-5), 479-493.
- Vogt, S., Di Rienzo, F., Collet, C., Collins, A., & Guillot, A. (2013). Multiple roles of motor imagery during action observation. *Frontiers in Human Neuroscience*, *7*.
- Williams, J., Omizzolo, C., Galea, M. P., Vance, A. (2013). Motor imagery skills of children with Attention Deficit Hyperactivity Disorder and Developmental Coordination Disorder. *Human Movement Science*, *32*, 121-135.
- Williams, J., Thomas, P. R., Maruff, P., & Wilson, P. H. (2008). The link between motor impairment level and motor imagery ability in children with developmental coordination disorder. *Human Movement Science*, *27*(2), 270-285.

- Wilson, P. H., Adams, I. L. J., Caeyenberghs, K., Thomas, P., Smits-Engelsman, B., & Steenbergen, B. (2016). Motor imagery training enhances motor skill in children with DCD: A replication study. *Research in Developmental Disabilities, 57*, 54–62.
- Wilson, P. H., & Maruff, P. (1999). Deficits in the endogenous control of covert visuospatial attention in children with developmental coordination disorder. *Human Movement Science, 18*(2-3), 421-442.
- Wilson, P. H., Maruff, P., Ives, S., & Currie, J. (2001). Abnormalities of motor and praxis imagery in children with DCD. *Human Movement Science, 20*(1–2), 135–159.
- Wilson, P. H., & McKenzie, B. E. (1998). Information processing deficits associated with developmental coordination disorder: A meta-analysis of research findings. *The 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.
- Wilson, P. H., Thomas, P. R., & Maruff, P. (2002). Motor Imagery Training Ameliorates Motor Clumsiness in Children. *Journal of Child Neurology, 17*(7), 491–498.
- Wolpert, D. M. (2000). Abnormalities in the awareness and control of action. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences, 355*(1404), 1771-1788.
- Wolpert, D. M., & Ghahramani, Z. (2000). Computational principles of movement neuroscience. *Nature neuroscience, 3*(11), 1212-1217.
- Wolpert, D. M., Ghahramani, Z., & Jordan, M. I. (1995). An internal model for sensorimotor integration. *Science, 269*(5232), 1880-1882.
- Wolpert, D. M., & Kawato, M. (1998). Multiple paired forward and inverse models for motor control. *Neural Networks, 11*(7), 1317–1329.

Wright, H. C., Sugden, D. A., Ng, R., & Tan, J. (1994). Identification of children with movement problems in Singapore: Usefulness of the Movement ABC Checklist. *Adapted Physical Activity Quarterly*, 11(2), 150-157.

Résumé

Le Trouble Développemental de la Coordination est un trouble psychomoteur d'étiologie encore inconnu, mais plusieurs modèles théoriques essayent d'expliquer les difficultés rencontrées par le sujet atteint dont celui du Déficit de Modélisation Interne. L'imagerie motrice, considéré comme un mécanisme de simulation de l'action peut rendre compte de l'intégrité ou de l'altération de ces modèles internes. Des tests mesurant la capacité d'imagerie motrice, ont montré qu'ils permettaient de différencier des sujets sains de sujets TDC. Un étalonnage français a donc été entrepris sur deux de ces outils, la « Tâche Radiale de Fitts » et du « Test de Jugement de Latéralité Manuelle ». Les premières données montrent un début de sensibilité entre les âges des sujets et une corrélation entre mouvement exécuté et mouvement imaginé. Enfin, l'étalonnage va se poursuivre afin d'augmenter la puissance statistique de ces tests. A terme, ces outils pourront être utilisé par le psychomotricien pour affiner son évaluation devant un enfant suspecté de TDC.

Mots clés : imagerie motrice – TDC - étalonnage – Tâche Radiale de Fitts – Test de Jugement de Latéralité Manuelle

Summary

Developmental Coordination Disorders's (DCD) is a psychomotor disorder of etiology still unknown, but several theoretical models try to explain the difficulties encountered by a DCD subject, including the Internal Modeling Deficiency (IDM). Motor imagery, considered as an action simulation mechanism, can account for the integrity or alteration of these internal models. Tests measuring motor imaging ability, showed that they allowed to differentiating healthy subjects from DCD subjects. A French calibration was therefore undertaken on two of these tools, the "Radial Fitts Task" and the "Manual Laterality Judgment Test". The first data showed a beginning of sensitivity between the ages of the subjects and a correlation between the movement performed and the movement imagined. Finally, calibration will continue to increase the statistical power of these tests. Ultimately, these tools can be used by the psychomotor therapist to refine his assessment in front of a child suspected of DCD.

Key words: motor imagery – DCD – calibration- Radial Fitts Task – Manual Laterality Judgment Test