

Intérêt de l'imagerie motrice comme technique de rééducation du Trouble de l'Acquisition des Coordinations

*MISE EN PLACE D'UN PROTOCOLE D'IMAGERIE MOTRICE DANS LE CADRE DE LA
REEDUCATION D'UN TROUBLE DE L'EQUILIBRE ET D'UNE DYSGRAPHIE*

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

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier Déborah Innocent-Mutel, ma maîtresse de mémoire, qui a su me guider et me soutenir dans l'élaboration de ce mémoire.

Je remercie aussi Emmanuel Madieu et Aurélie Vauchel pour leurs conseils et leurs réponses à mes questions.

Ensuite, je remercie ma maîtresse de stage Judith Chenus, qui m'a guidée dans mon évolution professionnelle et qui m'a aidée dans l'ajustement du protocole auprès des patients grâce à son expérience professionnelle.

Merci à ma famille et notamment Flavien Mellet et Emilie Mellet, mon frère et ma sœur, pour la relecture de mon mémoire et leur soutien.

Enfin, je tiens à remercier tout particulièrement mes amies Estefania Lopez et Faustine Brument pour leur présence sur ces trois années de formation et leur soutien pour cette dernière année.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
---------------------------	----------

PARTIE THEORIQUE

I-IMAGERIE MOTRICE : GENERALITES	4
---	----------

1.Définition	4
---------------------------	----------

2.L'imagerie motrice comme simulation de l'action.....	5
---	----------

2.1.Apports neurophysiologiques.....	5
--------------------------------------	---

2.2.Apports de la psychologie cognitive	6
---	---

2.3.Apports de la neuro-imagerie	7
--	---

3.Développement de l'imagerie motrice chez l'enfant	8
--	----------

II-LE MODELE INTERNE DU MOUVEMENT	13
--	-----------

1.Le contrôle moteur	13
-----------------------------------	-----------

2.Théorie du modèle interne du mouvement.....	15
--	-----------

2.1.Définition du concept	15
---------------------------------	----

2.2.Le modèle interne inverse	16
-------------------------------------	----

2.3.Le modèle interne direct	17
------------------------------------	----

2.4.Relation entre les modèles inverses et direct	18
---	----

2.5.Localisations neurophysiologiques	20
---	----

3.Imagerie motrice et modèles internes	21
---	-----------

4.Déficit de représentation interne du mouvement chez le sujet TAC	23
---	-----------

III-IMAGERIE MOTRICE ET TROUBLE DE L'ACQUISITION DES COORDINATIONS.....	27
--	-----------

1.Les paradigmes d'imagerie motrice comme investigation de l'intégrité des modèles internes de l'action	27
--	-----------

2.Evaluation des capacités d'imagerie motrice	27
--	-----------

2.1.Hand Rotation Task (HRT).....	28
-----------------------------------	----

2.2.Visually Guided Pointing Task (VGPT).....	29
---	----

2.3.Movement Imagery Questionnaire - Revised Second version.....	30
--	----

3. Les capacités d'imagerie motrice chez le sujet TAC.....	31
3.1. Capacités d'utilisation de l'imagerie motrice	31
3.2. Les différents composants de l'IM chez le sujet TAC (force, timing prédictif)	33
3.3. Lien entre les difficultés motrices du TAC et leurs capacités d'imagerie motrice	35
IV-CADRES D'UTILISATIONS ET PLASTICITE CEREBRALE	37
1. Cadre normal	37
1.1. Apprentissage et amélioration des performances motrices.....	37
1.2. Sport.....	38
1.3. Musique.....	39
2. Cadre pathologique.....	39
2.1. Accident Vasculaire Cérébral (AVC) et hémiplégie	40
2.2. Douleurs neuropathiques	41
2.3. Membres fantômes	41
2.4. Maladie de Parkinson	42
2.5. Dystonie, crampe de l'écrivain.....	43
3. Cadre des troubles psychomoteurs.....	43
3.1. La dysgraphie	43
3.2. Trouble de l'Acquisition des Coordinations (TAC).....	44
4. Imagerie motrice et plasticité cérébrale	45

PARTIE PRATIQUE

I-PROTOCOLE D'IMAGERIE MOTRICE	48
1. Les pré-tests.....	48
1.1. Visually Guided Pointing Task (VGPT).....	48
1.2. Hand Rotation Task	48
2. Description du protocole	49
2.1. Entraînement au timing prédictif.....	49
2.2. Exercice de pleine conscience.....	50
2.3. Observation de vidéos.....	51
2.4. Imagerie motrice.....	51

3.Conditions nécessaires à une pratique bénéfique.....	51
3.1.Le modèle PETTLEP.....	51
3.2.Caractéristiques pour une pratique bénéfique	52
3.3.Intégration au protocole	53
II-PROTOCOLE POUR LA PRISE EN CHARGE D'UNE DYSGRAPHIE.....	54
1.Présentation de Théo, [REDACTED].....	54
1.1.Eléments anamnestiques	54
1.2.Compte rendu pédiatrique – octo [REDACTED] [REDACTED] mois)	55
1.3.Observation éducative – févri [REDACTED] (9 ans 1 mois).....	55
1.4.Bilan orthophonique – Juin [REDACTED] (5 ans 5 mois).....	55
1.5.Bilan psychomoteur ([REDACTED] mois)	56
2.Evaluation des capacités d'imagerie motrice (pré-tests)	58
2.1.Visually Guided Pointing Task (VGPT).....	58
2.2.Hand Rotation Task	59
2.3.Conclusion	60
3.Mise en place du protocole et évolution.....	60
4.Post tests	63
4.1.VGPT	63
4.2.Hand rotation task.....	64
4.3.BHK.....	64
III-PROTOCOLE POUR LA PRISE EN CHARGE DES TROUBLES DE L'EQUILIBRE CHEZ UN PATIENT TAC.....	65
1.Présentation de Noah, 11 ans.....	65
1.1.Eléments anamnestiques	65
1.2.Observation éducative – M [REDACTED] [REDACTED] mois)	66
1.3.Bilan psychométrique - Fév [REDACTED] ([REDACTED] bis)	66
1.4.Bilan psychomoteur – Octo [REDACTED] [REDACTED] mois)	67
2.Evaluation des capacités d'imagerie motrice (pré-tests)	69
2.1.VGPT	69
2.2.Hand Rotation Task (HRT).....	70
2.3.Conclusion	71

3.Mise en place du protocole et évolution.....	71
4.Post tests	74
4.1.VGPT	74
4.2.Hand rotation task.....	75
4.3.M-ABC	76
DISCUSSION	77
CONCLUSION	80
BIBLIOGRAPHIE	81
ANNEXES	86

INTRODUCTION

Le trouble de l'acquisition des coordinations (TAC) est un trouble psychomoteur qui touche environ 6% des enfants de 5 à 11 ans et qui fait partie des troubles neuro-développementaux (DSM 5). Les sujets porteurs de ce trouble présentent une altération dans l'acquisition et l'exécution des habiletés motrices se traduisant par une lenteur et une imprécision dans la réalisation de celles-ci. Les difficultés et déficits peuvent se retrouver dès la petite enfance et ne peuvent être expliqués par une affection neurologique, une déficience intellectuelle ou un déficit sensoriel. Les conséquences de ce trouble sont multiples et impactent les apprentissages scolaires, la vie quotidienne, familiale et sociale et peuvent être à l'origine de difficultés psycho-affectives du sujet (DSM 5, 2013). Ce trouble perceptivo-moteur affecte les fonctions visuo-spatiales, visuo-constructives mais aussi le contrôle postural, la régulation tonique, l'équilibre statique et dynamique, les coordinations dynamiques générales, la motricité manuelle et l'écriture.

Aux vues des multiples répercussions de ce trouble, il est nécessaire de penser à une prise en charge adaptée pour ces patients. A l'heure actuelle, de nombreuses recherches ont été effectuées et soutiennent différentes approches pour la rééducation du TAC. Deux catégories d'interventions se distinguent alors : les interventions orientées sur le déficit et les interventions orientées sur la performance. Cette deuxième catégorie comprend notamment les techniques de rééducation à dominante cognitive comme la CO-OP (Cognitive Orientation to daily Occupational Performance) dont les différentes études réalisées ces dernières années attestent de son efficacité. Par ailleurs, il existe un intérêt récent pour l'imagerie motrice, une technique novatrice pour la prise en charge des troubles moteurs chez les sujets porteurs d'un TAC. Cependant, il n'existe actuellement que peu d'études venant soutenir son efficacité.

Je me suis donc interrogée sur l'efficacité de cette technique dans la prise en charge psychomotrice du TAC et plus spécifiquement sur les troubles moteurs. Par ailleurs, je me suis aussi demandé si cette technique pouvait avoir des effets positifs sur différentes habiletés, ou si elle était plus adaptée à un trouble moteur spécifique. Ayant rencontré sur mon lieu de stage deux jeunes patients porteurs d'un TAC dont l'un présente un trouble de l'équilibre (statique et dynamique) majeur et le second une dysgraphie importante, je me suis posée les questions suivantes :

- Quels sont les protocoles d'imagerie motrice existant et comment les mettre en place ?
- Quelle est leur spécificité dans la prise en charge des sujets TAC ?
- L'imagerie motrice est-elle efficace dans la rééducation des troubles de l'équilibre et de la dysgraphie chez des patients porteurs d'un TAC ?

Nous aborderons dans une première partie théorique quelques généralités sur l'imagerie motrice, notamment la définition de celle-ci et son développement chez l'enfant. Nous définirons le concept du modèle interne du mouvement ainsi que sa relation avec l'imagerie motrice et le trouble de l'acquisition des coordinations. Nous étudierons ensuite les capacités d'imagerie motrice chez les sujets TAC et les différents cadres d'utilisation de cette technique.

La partie pratique expliquera dans un second temps les protocoles d'imagerie motrice existant et leur mise en place pour la rééducation des troubles de l'équilibre et d'une dysgraphie chez deux patients porteurs d'un TAC. Enfin, nous terminerons par une discussion sur l'efficacité de cette technique.

PARTIE
THEORIQUE

I- IMAGERIE MOTRICE : GENERALITES

1. Définition

L'être humain est doué de nombreuses capacités psychomotrices tant en imitation, apprentissage qu'en représentations mentales. Toutes ces compétences sont à mettre en lien avec un processus indispensable qu'est la représentation mentale de l'action. Afin de comprendre ce système complexe de nombreux auteurs se sont intéressés à l'imagerie motrice (IM).

Stricker proposait déjà au XIX^{ème} siècle l'idée que simuler une action et la réaliser partageraient les mêmes processus. Mais c'est Ribot en 1912 qui proposa la toute première définition de l'Imagerie Motrice (IM) : « en termes psychologiques, c'est la reviviscence spontanée ou provoquée de sensations kinesthésiques simples ou complexes éprouvées 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 » (Guilbert et al., 2013). Dans cette définition nous pouvons déjà noter plusieurs notions importantes qui définissent l'imagerie motrice : l'idée de sensations kinesthésiques, d'excitation corticale et de mouvement non exécuté.

Jeannerod (1995a) définit par la suite plus précisément l'IM comme la possibilité d'accéder au contenu de l'intention du mouvement qui se fait habituellement inconsciemment lors de la phase de préparation du mouvement. Il s'agit donc ici de s'imaginer réaliser un mouvement sans pour autant l'exécuter réellement.

Il faut toutefois différencier l'imagerie motrice des autres formes d'imageries internes comme l'imagerie mentale ou visuelle. En effet, l'IM demande à l'individu d'expérimenter une action motrice à partir d'une perspective interne ou à la première personne. Les modalités sensorielles alors impliquées, outre la vision, sont la kinesthésie et la proprioception. L'individu est alors invité à ressentir dans son corps toutes les conséquences sensorimotrices de l'action ainsi que ses caractéristiques temporelles, spatiales, proprioceptives et kinesthésiques. En revanche, l'imagerie visuelle ou mentale consiste à s'imaginer réaliser une action motrice d'un point de vue externe, ou autrement dit à la troisième personne. Ce processus se base alors sur des données visuelles et le sujet voit défiler la scène sans aucun ressenti proprioceptif ou kinesthésique (Jeannerod 2001; Puyjarinet, 2015).

Ainsi, l'IM correspond à un état cognitif dynamique conscient qui permet l'accès à la représentation interne d'un mouvement, ou d'une action, (avec ses caractéristiques temporelles, spatiales, proprioceptives et kinesthésiques), pendant sa phase de préparation, et ceci à partir d'une vision égocentrée et en l'absence de tout mouvement exécuté. L'IM peut porter sur l'ensemble du corps ou seulement une partie.

2. L'imagerie motrice comme simulation de l'action

Ce postulat de l'imagerie motrice comme simulation de l'action fut évoqué pour la première fois par Jeannerod. Ce dernier considère alors que l'IM serait la simulation d'une action motrice. Elle impliquerait les mêmes réseaux neuronaux que l'action réelle, inhibée avant toute exécution. De nombreux travaux issus de divers domaines, comme les sciences cognitives et comportementales ou neurophysiologiques, ont par la suite vu le jour afin de venir vérifier cette hypothèse. Ils ont notamment contribué à une meilleure compréhension de l'IM et apportés des éléments affirmant une similitude entre action simulée et action exécutée

2.1. Apports neurophysiologiques

Les travaux issus de cette discipline ont permis de rendre compte des processus sous-jacents à la simulation d'une action. Des études ont ainsi révélé que mouvement simulé et mouvement exécuté partagent les mêmes caractéristiques physiologiques. Et c'est à James et Jacobsen que revient cette observation : ils ont montré que la création d'une image mentale d'une action entraînait systématiquement une décharge des muscles impliqués dans cette action. Avec toutefois l'intervention de mécanismes d'inhibition pour bloquer l'exécution de l'action (Puyjarinet, 2015).

Par ailleurs, d'autres travaux sur le système nerveux autonome sont venus soutenir le postulat de Jeannerod. L'étude alors réalisée par Decety, Jeannerod, Germain et Pastene (1991) consistait à analyser le rythme cardiaque et respiratoire des sujets en fonction de leur vitesse de marche, en simulation et en action réelle. Il est ainsi observé une covariation de ces rythmes en fonction de la vitesse demandée et donc de l'effort. Ceci nous indique donc la présence d'une anticipation des changements métaboliques qu'induirait une marche réelle. Ainsi, on retrouve une activation physiologique cardio-respiratoire déclenchée par la

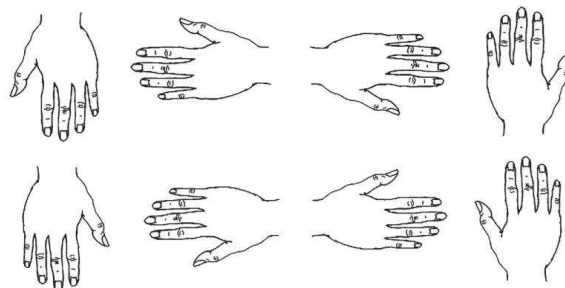
représentation de l'action. Ces réponses neurovégétatives viennent donc témoigner indirectement de l'activité du système nerveux central lors de l'IM.

2.2. *Apports de la psychologie cognitive*

Afin d'étudier l'imagerie motrice, processus cognitif non observable sur le plan comportemental, les chercheurs se sont intéressés aux propriétés communes à l'action simulée et exécutée. Ainsi, il a été mis en exergue deux caractéristiques principales présentes que l'action soit simulée ou exécutée : des caractéristiques biomécaniques et temporelles. (Guilbert et al., 2013).

Caractéristiques biomécaniques

La préservation des caractéristiques biomécaniques du mouvement lors de la simulation d'une action a permis aux chercheurs d'élaborer le paradigme de *jugement d'actions*. Celui-ci permet alors une évaluation implicite de l'imagerie motrice. La tâche demandée aux sujets n'est pas de s'imaginer réaliser une action mais de juger si une action donnée est réalisable ou non. Il est couramment utilisé des photographies de mains présentées sous diverses orientations à partir desquelles le sujet doit juger la latéralité ou dire s'il est possible de réaliser un geste de prise. Il doit bien évidemment ne pas réaliser de mouvement. Ce type d'étude repose sur la rotation mentale. Et c'est Shepard et Metzler (1971) qui ont été les premiers à proposer ce genre d'épreuves. Ils mesuraient le temps de réaction du sujet pour dire si les deux cibles présentées étaient identiques ou non. Ce temps de réaction était censé révéler le temps nécessaire afin de simuler un mouvement de rotation de la cible.



Epreuve de jugement de latéralité

Ces recherches révèlent donc que les sujets ont recours à l'imagerie motrice et non à l'imagerie visuelle lors de jugement d'actions.

Par ailleurs, ce temps de réaction pour juger de la latéralité des mains présentées a été comparé en fonction du degré angulaire de l'orientation des mains. Il a été observé que les temps de réaction ne varient pas linéairement selon l'orientation. Ce temps est corrélé positivement avec l'écart angulaire de la main mais il dépend aussi et surtout des contraintes biomécaniques qu'implique la rotation (Guilbert et al., 2013).

Caractéristiques temporelles

Par ailleurs, les travaux dans le domaine de la psychologie ont montré qu'il existerait une invariance temporelle entre actions simulées et actions exécutées. Sont alors étudiées les corrélations entre le temps nécessaire pour simuler une action et celui pour la réaliser. Ces études portant sur cette caractéristique temporelle ont conduit à l'élaboration du paradigme de chronométrie mentale. Celui-ci montre que action imaginée et action exécutée partagent les mêmes caractéristiques temporelles. Ainsi, il faudra autant de temps à un individu pour atteindre une cible en marchant réellement qu'en s'imaginant l'atteindre. (Guilbert et al., 2013)

De plus, la loi de Fitts est également conservée lors de la simulation d'une action. Cette loi rend compte du conflit vitesse/précision qui régule de nombreuses activités motrices. Fitts a montré que le temps pour réaliser un mouvement est lié de manière linéaire à l'indice de difficulté de la tâche. C'est-à-dire que sur une tâche d'atteinte d'une cible en marchant, la durée de l'action simulée sera proportionnelle et linéaire à la distance à parcourir.

Ainsi, les études en psychologie ont permis de mettre en évidence l'existence d'une isochronie entre un mouvement réel et un mouvement imaginé. La durée du mouvement dans les deux cas serait la même et respecterait la loi de Fitts.

2.3. *Apports de la neuro-imagerie*

Les travaux réalisés à partir de techniques d'imagerie médicale comme la Tomographie par émission des positons (TEP) ou l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) sont venues soutenir l'hypothèse d'une similitude entre action simulée et exécutée.

C'est donc par ces techniques qu'il a pu être affirmé que les mêmes réseaux neuronaux centraux étaient activés, que l'action soit simulée ou exécutée (Decety et al., 1997). Les structures cérébrales impliquées sont les suivantes : le cortex pariétal, l'aire motrice

supplémentaire (AMS), le cortex prémoteur dorsal et ventral, le cervelet, les ganglions de la base et le cortex moteur primaire.

Ces travaux viennent soutenir l'hypothèse de Jeannerod (2001) selon laquelle il existerait un *continuum fonctionnel* entre action exécutée et action simulée. Il attribue alors le nom d'*état S* (*S pour simulation*) à l'ensemble des états cognitifs (jugement d'actions, observation d'objets manipulables, d'actions réalisées par un tiers) dont le sujet n'a pas conscience mais qui impliquent un même ensemble de structures neuronales qui s'activent lors de l'exécution et de la simulation de l'action. Par conséquent, l'IM serait un *état S particulier* dont le sujet peut avoir un accès conscient.

Ces multiples travaux issus de la neurophysiologie, de la psychologie et de la neuro-imagerie permettent d'affirmer que action simulée et action exécutée partagent des caractéristiques communes tant physiologiques, neurovégétatives, chronométriques que corticales.

3. Développement de l'imagerie motrice chez l'enfant

Tout au long de la vie notre cerveau subit de nombreux changements tant structurels que fonctionnels, dont les plus importants se retrouvent lors de l'enfance. Le développement des habiletés motrices implique des processus neurocognitifs très complexes et ceux-ci se mettent en place avec la maturation cérébrale et se performant avec l'expérience. La représentation interne du corps et de ses mouvements sont donc aussi susceptibles de changer avec l'âge. Ainsi, afin de maintenir un contrôle moteur efficient, le système de représentation du mouvement doit se mettre à jour.

L'imagerie motrice joue alors un rôle très important afin de vérifier si l'action voulue et représentée correspond au but attendu. Ce fonctionnement constitue une forme d'apprentissage par erreur et permet à notre système de se développer et de modifier la représentation qu'il a des mouvements, et ceci grâce à l'expérience (Caeyenberghs et al., 2009)

Il est alors intéressant de s'intéresser au développement des capacités d'imagerie motrice lors de l'enfance et de l'adolescence et de les comparer à leurs habiletés motrices. Les études sur l'IM portent pour la majorité sur l'adulte. Bien qu'il soit intéressant de comprendre le

fonctionnement de l'IM chez l'adulte, la question des capacités d'imagerie chez l'enfant est tout aussi cruciale. C'est ainsi que de nombreux chercheurs se sont penché sur l'étude de l'âge d'apparition de ces capacités.

Afin de comprendre comment s'effectue l'émergence de l'imagerie motrice chez l'enfant et son développement, nous allons aborder 4 études présentées dans la revue de Guilbert, Jouen, Lehalle et Molina (2013).

Etude de Molina, Tijus et Jouen (2008) sur des enfants de 5 à 7 ans

Afin d'étudier l'imagerie motrice chez les enfants de 5 à 7 ans, les chercheurs ont eu recours au paradigme de chronométrie mentale. Celui-ci fut développé en premier lieu chez l'adulte par Decety et repris, et adapté, chez l'enfant par Molina et al. (2008)

Ces auteurs ont donc évalué l'invariance temporelle entre les situations d'imagerie et de condition réelle, à partir d'une expérience où la tâche consiste à prendre une poupée et à l'amener d'un point A à un point B. En situation de marche réelle, les enfants avaient pour consigne de prendre la poupée posée sur un socle et de l'amener dans sa maison. Dans la situation d'imagerie, il leur était demandé de prendre la poupée et la maintenir soulevée tout le temps nécessaire de marche pour rejoindre le point B, c'est-à-dire la maison de poupée.

Deux situations étaient alors proposées : un premier groupe ne recevait aucune information concernant le poids de la poupée (condition contrôle), alors que pour le deuxième groupe la poupée était décrite comme étant très lourde (condition information). Le poids de la poupée est le même pour les deux conditions

Les résultats révèlent plusieurs points. Tout d'abord, l'information sur le poids de la poupée est prise en compte par les enfants de 7 ans qui augmentent alors leur durée de déplacement en condition d'imagerie et en condition réelle. Néanmoins, il n'y a pas de différence significative entre la force de pression dans la condition contrôle et dans la condition information. Ensuite, toujours dans cette condition information, il est retrouvé chez les enfants de 7 ans un temps de marche simulé proportionnel au temps de marche réel. Ceci n'est cependant pas retrouvé chez les enfants de 5 ans, et dans n'importe quelle condition.

Ainsi, pour Molina et al. (2008) l'imagerie motrice interne n'est accessible spontanément chez les enfants qu'à partir de 7 ans mais seulement lorsque l'enfant est contraint de simuler les conséquences proprioceptives de ses actions.

Etude de Funk, Brugger et Wilkening (2005) : relation entre imagerie motrice et développement moteur

Leur étude a pour but de montrer que la capacité d'imagerie est dépendante de l'activité motrice réelle de l'enfant.

Ils ont donc procédé à l'évaluation des capacités d'imagerie motrice implicite chez des enfants de 5-6 ans en utilisant le paradigme de jugement de latéralité. La tâche consistait à présenter aux enfants des photographies de mains, soit en position dorsale soit en position palmaire, qui devaient alors déterminer la latéralité de ces mains. Pour voir si l'activité motrice de l'enfant a des conséquences sur son jugement de latéralité, il leur était demandé d'effectuer la tâche avec les mains soit en position palmaire, auquel cas ils devaient donner leur réponse en appuyant sur un boîtier avec les paumes vers le haut, soit en position dorsale avec les paumes vers le bas. Leurs mains étaient aussi recouvertes d'un tissu.

Il ressort des résultats que seulement 60% des enfants ont réussi la tâche. Ceux-ci ont donc eu recours, implicitement, à l'imagerie motrice afin de donner leurs réponses. Il a aussi été démontré l'existence d'une congruence posturale, c'est-à-dire que les enfants répondent plus vite lorsque leurs mains sont dans la même position que celles des photographies présentées. Ceci souligne bien le lien réel entre l'activité motrice de l'enfant et l'activation du processus d'imagerie motrice. De plus, les enfants ont montré une plus grande rapidité dans leurs réponses lorsque les positions de mains présentées respectaient les contraintes biomécaniques du corps. Ceci vient confirmer l'idée que l'imagerie motrice est sous la dépendance de l'activité motrice de l'enfant.

Aux vues de ces résultats, les auteurs ont conclu que l'imagerie motrice n'est pas forcément accessible à tous les enfants de 5-6 ans.

Etude de Caeyenberghs, Tsoupas, Wilson et Smith-Engelsman (2009) chez les enfants de plus de 7 ans

Ces chercheurs ont étudié chez des enfants de 7 à 12 ans les relations entre imagerie motrice et imagerie visuelle ainsi que celles entre imagerie motrice et habiletés motrices. Afin d'évaluer les capacités d'imagerie motrice, 2 tâches étaient proposées aux enfants :

- La Radial Pointing Task (RPT) : implique la loi de Fitts. L'enfant doit, avec un stylo, effectuer des aller-retour entre un cercle au milieu de la feuille et des rectangles situés

tout autour. Ces derniers représentent 5 index de difficulté. L'épreuve est alors effectuée en situation réelle et en situation imaginée

- La tâche de jugement de latéralité : il était explicitement demandé aux enfants d'imaginer tourner leurs propres mains afin de la faire correspondre à la position de celle de la photographie, et les enfants n'avaient pas leurs mains en position palmaire ou dorsale pour répondre.

Pour évaluer les capacités d'imagerie visuelle, il était présenté aux enfants un stimulus dont ils devaient juger s'il avait une orientation identique ou en miroir par rapport au stimulus cible.

Les habilités motrices ont enfin été évaluées par le MacCarron Assessment of Neuromuscular Development (MAND)

Les résultats des tâches d'imagerie motrice montrent que les capacités d'IM sont réelles dès l'âge de 7 ans et qu'il existe ensuite une progression développementale de ces capacités. En effet, il est observé des changements à partir de 9-10 ans : à tout âge et chez tous les enfants, la loi de Fitts est bien présente en condition réelle mais elle n'est conservée en condition imaginée qu'à partir de 9 ans. Par ailleurs, grâce à l'analyse de l'invariance temporelle, il a été relevé que les corrélations entre durée de pointage réel et imaginé augmentent significativement entre 7 et 12 ans. Ceci témoigne ainsi d'une plus grande précision en imagerie motrice chez les enfants de 12 ans qui sont alors capables d'intégrer les contraintes de la tâche. De plus, à 7 ans l'estimation de la durée de pointage en imagerie reste peu précise, ce qui souligne leur difficulté à créer et utiliser des représentations motrices.

Les résultats aux tâches de jugement de latéralité montrent que les enfants de 12 ans présentent moins de difficultés que ceux de 7 ans à s'imaginer des mouvements de main et que le lien entre imagerie motrice et habileté motrice se renforce avec l'âge.

Etudes de Choudhury, Charman, Bird et Blakemore (2007a, 2007b)

Ces chercheurs ont utilisé le paradigme de chronométrie mentale afin d'étudier et de comparer les capacités d'imagerie motrice entre les adultes et les adolescents d'environ 13 ans.

Les résultats montrent qu'on retrouve bien chez les deux populations une relation entre durée du mouvement imaginé et durée du mouvement réel avec une augmentation de la corrélation avec l'âge des sujets. Ceci souligne une amélioration des capacités d'IM avec l'âge entre l'adolescence et l'âge adulte.

Conclusion des études

L'ensemble des études portant sur le développement des capacités d'imagerie motrice chez l'enfant que nous pouvons retrouver dans la littérature nous révèle qu'il existe 3 phases dans le développement de l'imagerie motrice interne :

- La première phase correspond à la période entre 5 et 7 ans avec l'émergence des capacités d'imagerie motrice
- Pendant la deuxième phase, qui s'étend jusqu'à 9-10 ans, les enfants sont en mesure de respecter la loi de Fitts lors des situations d'imagerie d'une action motrice
- Enfin la dernière phase correspond à l'adolescence et au développement des capacités d'imagerie motrice qui suivent et dépendent des modifications des représentations internes de l'action induites par les changements morphologiques, la maturation cérébrale et les référentiels posturaux.

II- LE MODELE INTERNE DU MOUVEMENT

Dans cette partie, nous verrons que la théorie du modèle interne du mouvement tient une place indispensable dans l'explication du contrôle moteur. Après l'avoir définie, nous nous intéresserons au lien que ce modèle peut avoir avec l'imagerie motrice. Enfin, nous expliquerons pourquoi ce modèle est utilisé comme une des hypothèses étiologiques du Trouble de l'Acquisition des Coordinations.

1. Le contrôle moteur

De nombreuses actions de la vie quotidienne nécessitent un contrôle moteur sans que nous nous en apercevions. En effet, lorsque nous voulons attraper une balle en mouvement, par exemple, il est nécessaire que le cerveau prenne en compte un certain nombre d'informations liées aux propriétés neurophysiologiques et biomécaniques du corps. De plus, il est possible que des changements surgissent, comme la balle heurtant un obstacle, rendant alors le mouvement initial inadéquat, alors même qu'il soit déjà déclenché. Néanmoins, avec le temps, nous parvenons à ajuster et adapter nos mouvements aux contraintes environnementales et biomécaniques.

Et c'est grâce à notre système sensori-moteur du contrôle moteur que nous y parvenons. En effet, il existe un signal d'erreur (Fig 1) que le cerveau utilise afin de corriger ses mouvements et de s'adapter aux changements. Ce signal est émis par le SNC grâce à la comparaison qu'il effectue entre les prédictions sensori-motrices, réalisées à partir de la copie d'efférence de la commande motrice, et les afférences sensori-motrices, de l'action produite.

La commande motrice est générée en fonction du mouvement désiré, de l'état initial du système sensori-moteur ainsi que de l'environnement. Lorsque cette commande motrice est envoyée aux effecteurs (les muscles), une copie interne de celle-ci est générée. Il s'agit de la copie d'efférence. Celle-ci contient les prédictions des conséquences sensorielles du mouvement programmé. C'est alors que ces prédictions sont comparées aux afférences sensorielles du mouvement exécuté. Si une différence est perçue lors de cette comparaison, elle sera appelée « erreur sensori-motrice ».

Le cerveau aura alors deux aptitudes, indispensables pour le contrôle moteur. Tout d'abord, il proposera une correction motrice du mouvement lorsqu'un élément viendra perturber le bon déroulement du mouvement désiré et le rendre inadéquat, et ceci pendant l'action. Ensuite, cette erreur entrainera une adaptation de la commande motrice par le SNC qui réajustera la commande motrice à venir en fonction des erreurs de la commande motrice précédente

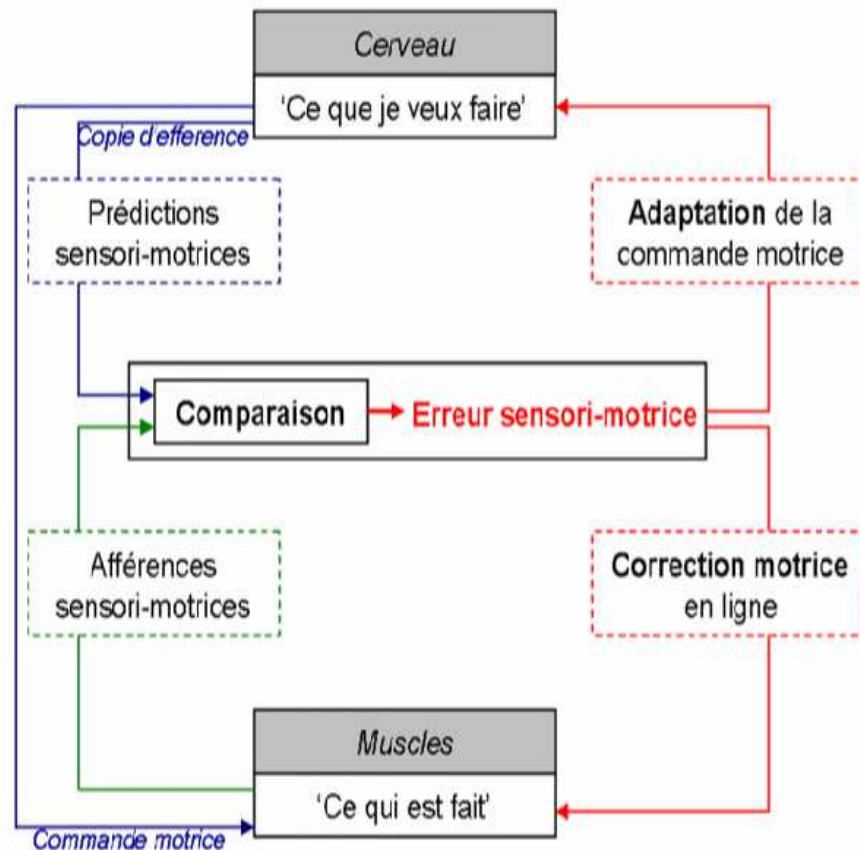


Figure 1 : Schématisation du contrôle moteur

(Fautrelle, 2012)

Le contrôle moteur requière des régulations permanentes en fonction des perturbations de l'environnement. Le cerveau produit un signal d'erreur en comparant les prédictions de sortie d'une action à la sortie réelle. Ce signal induira une correction motrice de la part du SNC et des adaptations de la commande motrice

2. Théorie du modèle interne du mouvement

2.1. Définition du concept

Cette notion de modèle interne appartient aux théories computationnelles et cognitives. Pour ces théories, les informations issues de l'environnement ne suffisent pas à elles seules. Wolpert et Ghahramani (2000) définissent ainsi ce concept comme un ensemble de connaissances implicites des caractéristiques physiques du corps (cinématiques, musculaires), du monde extérieur et de leurs interactions.

Ce concept s'intéresse au lien entre les entrées sensorielles et la sortie motrice lors de la production d'un mouvement. Car à chaque mouvement, les systèmes moteurs, sensoriels et l'environnement entrent en interaction. Le système nerveux central (SNC) doit alors s'adapter en permanence afin de produire une motricité correspondant aux buts et attentes du mouvement et prenant en compte l'environnement changeant. Le contrôle moteur permet ainsi d'amener une compréhension des paramètres à contrôler. (Lebon, Gueugneau et Papaxanthis, 2013)

Cette théorie des modèles internes postule l'idée que le SNC possède des représentations simplifiées de l'état du système sensori-moteur. Celles-ci lui permettent de prédire et contrôler ses états futurs. Ces représentations se créent grâce aux divers apprentissages et deviennent des modèles comparatifs.

Le terme « modèle » suggère que le SNC est capable de modéliser les interactions entre les systèmes sensoriels, moteurs et environnementaux. Le terme « interne » apporte l'idée que ces processus sont pleinement intégrés dans le SNC, au sein de circuits neuronaux.

Par ailleurs, ces mécanismes neuronaux peuvent simuler les entrées et sorties du système sensori-moteur dans deux sens différents, qui reflètent les deux types de modèles internes aux rôles différents : le modèle interne inverse et le modèle interne prédictif (Kawato, 1999). Si l'entrée du système correspond à l'intention de l'action, l'état initial du système et de l'environnement et la sortie à la commande motrice, on parlera de modèle interne inverse. Si l'entrée du système reçoit la copie d'efférence de la commande motrice afin de prédire en sortie les conséquences sensori-motrices de l'action, on parlera de modèle interne prédictif ou direct.

2.2. *Le modèle interne inverse*

Ce modèle permet de générer une commande motrice adaptée en fonction de sa connaissance de l'état actuel du système mais aussi de l'environnement et de l'action souhaitée. Ce modèle est nommé « inverse » car il doit, à partir du but et des conditions initiales, établir une commande motrice. Autrement dit, ce système définit les entrées à partir des sorties.

L'entrée de ce modèle correspondra aux propriétés du système sensori-moteur et environnemental. La sortie sera l'élaboration de la commande motrice adéquate à l'action désirée (Fig 2).

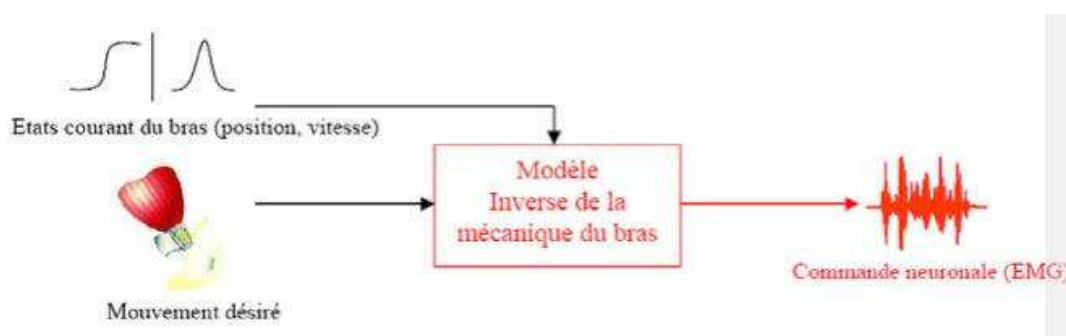


Figure 2 : Schématisation du modèle interne inverse de la dynamique du bras

(Lebon, Gueugneau, Papaxanthis, 2013)

Shadmehr et Mussa-Ivaldi (1994) proposent un exemple expérimental attestant de l'existence de ce modèle interne inverse. Ils ont étudié les trajectoires d'un mouvement de bras, lors d'un pointage d'une cible, soumis à un champ de force nouveau et inhabituel. Le sujet est alors perturbé dans la réalisation du mouvement de bras et notamment dans la trajectoire, par les contraintes environnementales. Après quelques essais et répétitions, le sujet devient capable de s'adapter aux contraintes et perturbations dynamiques de l'environnement en produisant des commandes motrices appropriées à l'état courant du système et du mouvement voulu. Le champ de force est ensuite retiré, les conditions environnementales redeviennent alors normales. On retrouve néanmoins une perturbation des mouvements de bras dans des directions opposées aux forces exercées précédemment. Ces perturbations reflètent bien l'existence d'un modèle interne inverse appliqué ici à la dynamique du bras.

Ainsi, le modèle interne inverse participe à la planification motrice et établit une relation non causale entre les systèmes sensoriels (mouvement souhaité), dynamiques (état du système) et la commande motrice. L'action et ses conséquences sur le corps et l'environnement sont donc inversées. (Lebon, Gueugneau et Papaxanthis, 2013)

2.3. *Le modèle interne direct*

Ce modèle interne direct, ou aussi appelé prédictif, permet d'établir une relation causale entre l'action et ses conséquences sur le corps et l'environnement. Son rôle est d'anticiper et de prédire les conséquences sensori-motrices (sortie du système) d'une action à partir de la copie d'efférence de la commande motrice (entrée du système), et ceci en prenant en compte l'état actuel du système et de l'environnement (Fig 3). En outre, ce modèle anticipe l'état futur du système sensori-moteur en réalisant une simulation interne de la dynamique du processus de l'action, parallèlement au processus réel. (Lebon, Gueugneau et Papaxanthis, 2013)

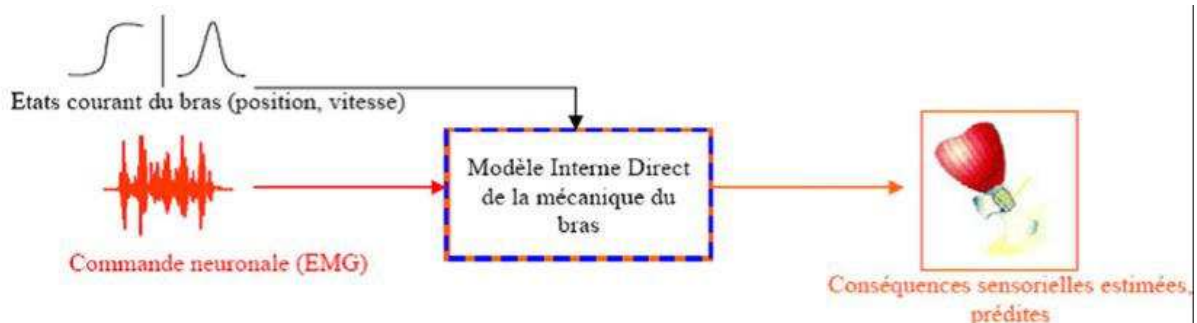


Figure 3 : Schématisation du modèle interne direct de la dynamique du bras

(Lebon, Gueugneau, Papaxanthis, 2013)

Le modèle interne direct est subdivisé en deux modèles complémentaires :

- Le modèle direct dynamique : en fonction de l'état courant du système et de la copie d'efférence, ce modèle pourra prédire l'état futur du système (position, vitesse etc.).

- Le modèle direct sensoriel : il reçoit par le modèle dynamique l'information sur l'état futur du système, ce qui lui permet de prédire les sensations correspondantes, et de calculer la sortie sensorielle estimée

L'association en série de ces modèles internes directs permet au SNC de comparer les conséquences sensorielles prédites d'un mouvement aux conséquences réelles de l'exécution de ce mouvement.

Davidson et Wolpert (2005) ont attesté l'existence de ce modèle interne direct par des études expérimentales de manipulations d'objets. Pour éviter que l'objet ne tombe lors de la manipulation, nous adaptons notre force de manipulation. Si le comportement de l'objet est imprévisible, nous utiliserons les feedbacks sensoriels afin de modifier notre prise. En revanche, si le comportement de l'objet est prévisible, nous pouvons utiliser des mécanismes de contrôle prédictifs dans le but de prédire les conséquences de nos mouvements de manipulation et ainsi ajuster au mieux notre prise par anticipation.

Ainsi ce modèle interne direct est indispensable à l'anticipation de l'état futur du système sensorimoteur et donc au contrôle moteur.

2.4. *Relation entre les modèles inverses et direct*

Ces deux modèles internes ont des rôles différents mais sont complémentaires et interdépendants dans leurs actions. En effet, alors que le modèle inverse génère une commande motrice en fonction de l'état du système et du mouvement désiré, le modèle direct aura une action parallèle en assimilant les états et sorties du système sensori-moteur grâce à la copie d'efférence.

Wolpert et Kawato (1998) estiment qu'il existerait une multitude de modèles internes directs et inverses. En effet, les conditions environnementales étant nombreuses et variables, les modèles inverses nous permettraient, selon eux, de faire face aux diverses situations rencontrées. Il serait alors possible de combiner les différents modèles internes afin de générer un important répertoire de comportements.

Flanagan et Wing (1997) ont réalisé une étude portant sur la coordination entre la force de préhension d'un objet et la force de charge afin d'expliquer la relation et l'existence des modèles internes direct et inverse. (Fig 4)

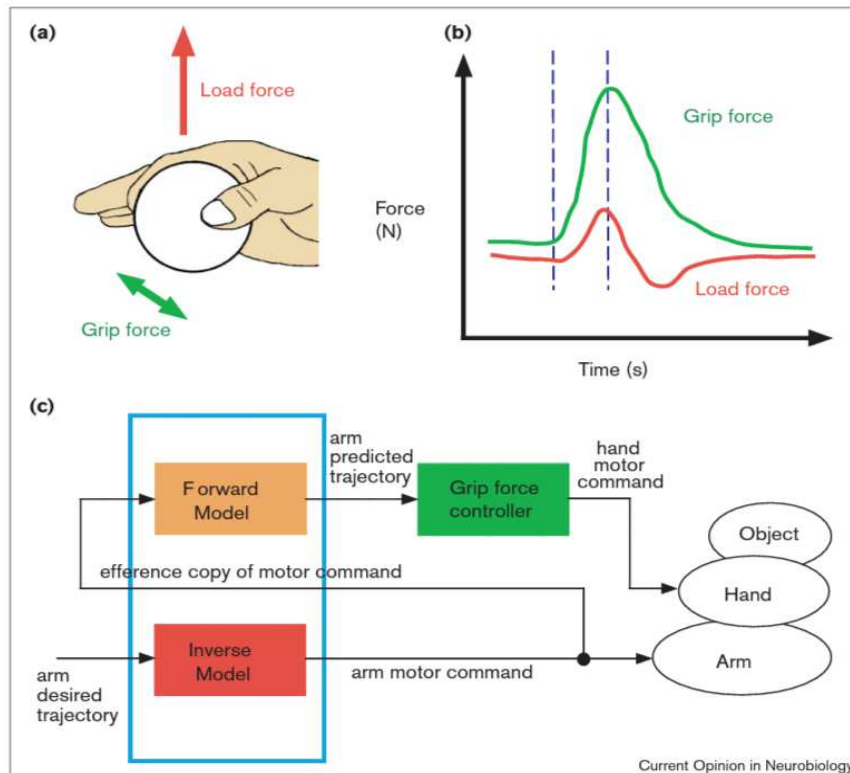


Figure 4 : Coordination entre la force de préhension d'un objet et la force de charge associée aux modèles internes directs et inverses (Flanagan & Wing, 1997)

(a) La force de préhension au contact d'un objet permet le développement d'une force de frottement qui empêche l'objet de tomber

(b) La force de préhension est contrôlée de façon à ce qu'elle soit légèrement supérieure à la force minimale de préhension nécessaire pour éviter la chute de l'objet

(c) Ce couplage force de préhension – force de charge est expliqué par les modèles internes directs et inverses du bras. Prenons l'exemple d'une mouvement de bras en direction d'un point, tout en maintenant un objet dans la main. Le modèle inverse détermine la commande motrice nécessaire en fonction de la trajectoire du bras, et l'envoie aux muscles du bras. Le modèle direct reçoit aussi cette commande par la copie d'efférence, ce qui lui permet de prédire la trajectoire future du bras. A partir de cette prédiction, la force de charge est calculée ainsi que la force de préhension minimale nécessaire. Ainsi, pour réaliser ce processus du couplage force de préhension – force de charge, trois éléments sont nécessaires : le modèle inverse pour l'atteinte de l'objectif du bras, le modèle direct pour la prédiction de la trajectoire du bras, et le contrôle de la force de préhension.

On retrouve par ailleurs cette complémentarité dans le cadre d'un apprentissage moteur. Certaines études ont démontré que le modèle interne direct intervient dans l'apprentissage d'un nouveau geste. Il est aussi ressorti de ces études que les sujets apprennent en premier lieu à prédire les conséquences de leurs actions avant d'apprendre à les contrôler (Flanagan et al., 2003). Ceci est en effet retrouvé dans les expériences de la dynamique du bras et de l'objet de Flanagan et al. (2003) : il a été montré que l'apprentissage du contrôle du bras (implication du modèle inverse) est plus long que l'apprentissage du calcul de la force de préhension exacte (implication du modèle interne direct).

Ceci nous invite à penser que l'on pourrait utiliser pour un apprentissage le modèle interne direct afin d'entraîner le modèle interne inverse qui permet le contrôle du système. Nous retrouvons ainsi une fonction complémentaire de ces deux modèles pour l'apprentissage d'un acte moteur.

2.5. *Localisations neurophysiologiques*

De nombreux auteurs se sont intéressés à la localisation dans le cerveau de ces deux modèles. Pour certains, le cervelet et le cortex pariétal constitueraient le siège de ces modèles.

De multiples études ont été réalisées afin de mettre en évidence cette localisation. Il a ainsi été démontré que le cervelet a une place particulière dans l'élaboration d'un modèle inverse pour la réalisation de mouvement, mais qu'il intervient aussi dans la prédiction des conséquences sensorielles de l'action. De plus, les études chez des patients pariétaux ont révélé qu'il leur était difficile de maintenir des représentations internes de l'état du corps. Enfin, il a été retrouvé chez des patients cérébro-lésés des difficultés dans la prédiction des conséquences d'une action mais aussi dans la simulation mentale d'un mouvement (Lebon, Gueugneau et Papaxanthis, 2013).

On retrouve ici l'idée que les modèles internes inverses et directs permettraient la compréhension des mécanismes de l'imagerie motrice. En effet, il est également retrouvé lors de la simulation d'un mouvement les mêmes activations corticales et sous-corticales que celles impliquées dans les mécanismes des modèles internes du contrôle moteur.

Ces résultats ont amené Lebon, Guillot et Collet (2008) à supposer que ces activations auraient un rôle dans la production de copie d'efférence en imagerie motrice, alors que la commande motrice est inhibée.

3. Imagerie motrice et modèle internes

Nous venons de voir que les modèles internes permettent de prédire les conséquences sensorimotrices d'une éventuelle action. En ce sens, Jeannerod (2001) décrit deux types d'actions : les actions « overt », qui sont réalisées, et les actions « covert » qui comprennent la représentation de l'action à réaliser mais sans exécution effective. Par ces observations, il a établi une théorie de simulation motrice. A partir de l'anticipation des conséquences d'une action, cette théorie fournirait des informations sur la faisabilité de l'action.

Il est néanmoins nécessaire de différencier la notion de simulation, utilisée dans les modèles internes, de celle employée en imagerie motrice. En effet, dans le domaine de l'imagerie motrice, ce terme exprime l'idée d'une représentation consciente d'un mouvement. En revanche, dans le cadre des modèles internes, cette notion renvoie à un mécanisme inconscient réalisé par le cerveau.

Ces dernières décennies, de nombreuses études ont essayé de comprendre les mécanismes impliqués dans l'imagerie motrice. Certaines découvertes, comme l'activation des régions motrices en condition d'imagerie et sans production réelle de mouvement, ou encore la facilitation de l'apprentissage par l'entraînement mental, ont amené les chercheurs à supposer que les modèles internes inverses et directs seraient impliqués dans l'imagerie, sans pour autant faire intervenir les feedbacks sensoriels du mouvement.

Et ceci a été validé par des études portant sur l'isochronie du mouvement. En effet, en condition d'imagerie, on peut observer que la commande motrice est générée mais inhibée. Néanmoins, même si aucune afférence sensorielle n'est disponible dû à cette inhibition, la copie d'efférence permettra quand même au modèle interne direct de prédire les conséquences de l'action. Ainsi, il est possible d'observer une isochronie entre mouvement imaginé et mouvement réel si les modèles directs et inverses sont efficaces. (Figures 5A et 5B) (Lebon, Gueugneau, Papaxanthis, 2013)

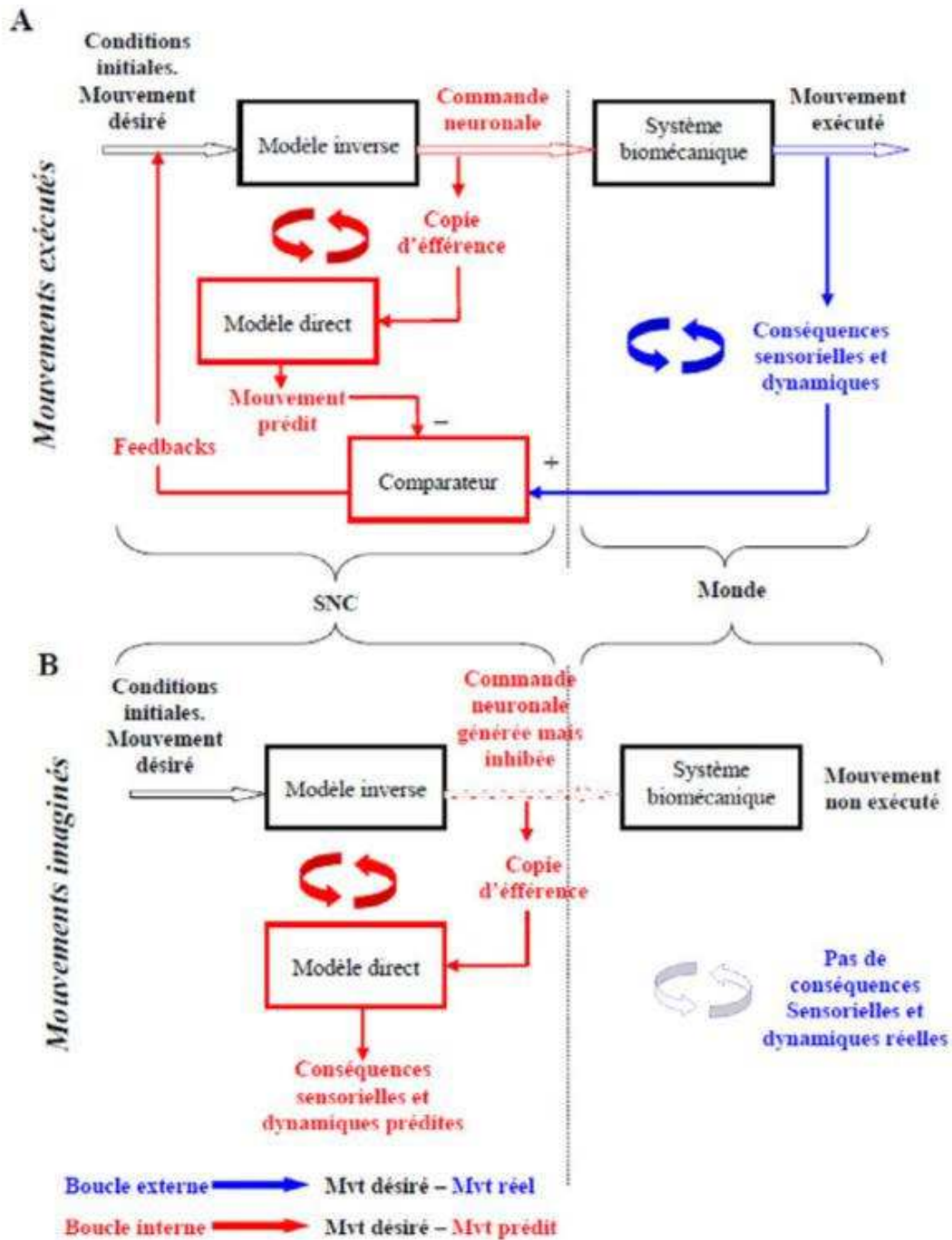


Figure 5 : Fonctionnement des modèles internes lors d'un mouvement exécuté et d'un mouvement imaginé

(A) La comparaison entre les mouvements voulus et les mouvements réalisés et prédits est réalisée grâce aux rétroactions internes (boucle rouge) et externes (boucle bleue)

(B) Il n'y a pas de rétrocontrôle externe. La copie d'efférence est disponible pour le modèle direct même s'il y a inhibition de la commande motrice, ce qui permet la comparaison mouvements désirés et prédits

Par ailleurs, les études ont eu recours aux technologies d'imagerie médicale (TEP, IRMf, SMT, scanner) afin de souligner la participation des processus cognitifs de l'action à l'imagerie motrice. Il a donc été montré que certains réseaux neuronaux impliqués dans la préparation de l'action sont également sollicités en IM (Decety, 1996), que l'activation de l'aire sensorielle primaire en IM atteste de l'existence du modèle interne direct sensoriel (Lebon, Gueugneau, Papaxanthis, 2013) et enfin que le cortex moteur primaire s'active en IM (Roth et al., 1996).

Ces nombreux résultats obtenus ont soulevé l'hypothèse d'une inhibition de la commande motrice dans le SNC. La copie d'efférence serait alors créée par l'activation des aires, pariétales, et cérébelleuses qui provoquerait une inhibition inter-hémisphérique du cortex moteur primaire afin d'empêcher l'envoi de la commande motrice aux effecteurs (Lebon, Gueugneau, Papaxanthis, 2013).

Ainsi, les modèles internes sont bien impliqués dans la simulation de l'action lors de l'imagerie motrice. Ils simuleraient l'activation des commandes motrices, et les signaux réafférents générés par l'action si elle était réellement exécuté. En outre, simuler une action reviendrait à comparer les signaux provenant des commandes centrales de l'action simulée avec les réafférences simulées. Pour de nombreux auteurs, l'imagerie motrice serait donc la capacité à générer des modèles internes du contrôle moteur.

4. Déficit de représentation interne du mouvement chez le sujet TAC

De nombreuses études se sont intéressées à l'étiologie du TAC. Les recherches sur ce trouble psychomoteur ont pris une certaine envergure ces dernières décennies afin d'apporter des hypothèses étiologiques et d'expliquer l'origine des difficultés rencontrées dans ce trouble. Certaines évoquent un dysfonctionnement cérébral diffus plutôt que la présence d'anormalités cérébrales dans une aire spécifique. D'autres recherches se sont penchées sur l'étude du système du contrôle moteur qui, d'après eux, serait déficient et rendrait compte des difficultés dans les apprentissages moteurs. (Adams et al., 2014)

Cette hypothèse d'un déficit de contrôle moteur fait référence aux modèles internes du mouvement. Il est donc plus précis de parler d'un éventuel déficit de modèle interne. Selon cette hypothèse, les sujets TAC auraient plus de difficultés à générer un modèle prédictif de l'action contrairement à leurs pairs (Wilson et al., 2013). Cependant, si un tel déficit est présent, cela a un impact considérable sur les capacités de contrôle moteur et d'apprentissages, car les modèles internes sont indispensables à la stabilité du système moteur. Ces difficultés sont d'ailleurs retrouvées chez les enfants TAC. Wilson et al. (2013) ont montré dans leur étude qu'ils présentent des mouvements lents et peu précis et qu'ils ont une dépendance excessive aux informations et feedbacks visuels. Ceci pourrait être expliqué par la présence de perturbations du cortex pariétal et du cervelet. En effet, des chercheurs ont noté que, sur une tâche d'imagerie motrice, les sujets TAC présentaient le même type de réponse motrice que les patients atteints d'une lésion pariétale (Adams et al., 2014)

Nous pouvons retrouver dans la littérature de nombreuses études venant soutenir et renforcer cette hypothèse d'un déficit de modèles internes. Ces dernières ont notamment étudié le déficit de contrôle moteur prédictif (ou le modèle interne direct) dans les mouvements manuels, des yeux mais aussi de la posture et de la démarche. Adams, Lust, Wilson et Steenbergen (2014) ont ainsi réalisé une revue afin de faire le point sur les preuves qui peuvent venir soutenir cette hypothèse étiologique chez le TAC, mais aussi elle a pour but de vérifier si ce déficit est généralisé à l'ensemble des systèmes moteurs ou s'il est spécifique à certains.

Afin d'évaluer la possibilité de générer un modèle interne direct chez les enfants TAC, les chercheurs utilisent divers paradigmes empruntés à l'imagerie motrice, comme le Visually Guided Pointing Task (VGPT), le double-step saccade task (DSST), le paradigme de rotation mentale et de chronométrie mentale. En effet, nous avons vu que mouvement simulé et mouvement exécuté partagent des mécanismes communs. Notamment la génération d'un modèle interne direct, même si aucun mouvement effectif n'est réalisé en condition d'imagerie. L'imagerie motrice est donc un moyen efficace et pertinent pour évaluer les modèles internes. Par ailleurs, de nombreux paradigmes et épreuves ont été mis au point afin d'évaluer les capacités d'imagerie motrice chez les enfants. C'est pourquoi les chercheurs ont recours à ces paradigmes pour venir vérifier l'hypothèse du déficit de modèle interne chez les sujets TAC.

L'ensemble des études réalisées sur l'hypothèse étiologique du TAC ont examiné trois domaines impliquant la génération de modèles internes : l'attention visuo-spatiale et le contrôle oculomoteur, le contrôle des actions manuelles ainsi que le contrôle postural dynamique. Chaque domaine est évalué en condition réelle (overt) et en condition d'imagerie (covert).

Attention visuospatiale et contrôle oculomoteur

En condition réelle, il ressort de ces études que les sujets TAC présentent des difficultés dans le contrôle prédictif du mouvement des yeux, et notamment lors de la planification et l'estimation des mouvements. La synchronisation temporelle des yeux afin de poursuivre une cible mouvante est tout aussi compliquée. Enfin, ils se révèlent être plus lents à désengager leur attention et utilisent des stratégies de contrôle inefficaces

Pour la situation d'imagerie, les modes d'attention exogène et endogènes ont été évalués. Les résultats de l'ensemble des études permettent d'apporter des preuves sur le déficit de contrôle attentionnel endogène qui serait alors expliqué par un déficit du contrôle inhibiteur.

Contrôle des actions manuelles

En condition réelle, il est révélé que les enfants TAC présentent de faibles capacités à faire appel au modèle interne direct, mais aussi qu'ils présentent des difficultés d'ajustement de la force manuelle en fonction des contraintes, et dans la rapidité de correction en temps réel de leurs erreurs. Enfin, leurs performances sont plus lentes et moins précises que les sujets contrôles ce qui s'explique par une réduction de l'anticipation de planification et d'adaptation aux contraintes des tâches

En condition d'imagerie, les sujets TAC se sont révélés être capables d'utiliser l'imagerie motrice mais avec plus de lenteur et moins de précision que les sujets contrôles. De plus, les mouvements simulés ne se conforment pas à la loi de Fitts, et ils se reposeraient plus sur de l'imagerie visuelle que de l'imagerie motrice pour réaliser les épreuves. Un déficit de contrôle prédictif dans de nombreuses tâches est observé et supporte fortement l'hypothèse du déficit de modèle interne

Contrôle postural dynamique

Seules 2 études ont examiné les ajustements posturaux anticipés lors d'une épreuve de lever de charge, qui requière notamment un contrôle anticipatoire. Les résultats montrent que les sujets TAC présentent peu de stabilisation posturale et manuelle, soulignant ainsi un déficit de modèle prédictif. Par ailleurs, leurs ajustements posturaux anticipés sont peu efficaces et retardés par rapport aux sujets contrôles. Ceci soutient l'idée d'un déficit de modèle interne dans les ajustements posturaux anticipés.

Conclusions de ces études

Il est ainsi apparu que les processus de modèles internes sont affectés dans différents systèmes de contrôle moteur (contrôle oculomoteur, manuel et postural) chez le sujet TAC. Le déficit s'est révélé présent dans les conditions réelles et d'imagerie, et serait plus un déficit central que spécifique à certains systèmes, tout comme les difficultés de chronométrie.

Cette première revue de littérature sur l'étude des modèles internes des mouvements, et notamment des modèles internes directs, permet d'apporter de nombreuses preuves quant à l'hypothèse du déficit de modèle interne chez le TAC. Il est ainsi retrouvé un déficit de contrôle prédictif qui se manifeste au travers de tous les systèmes moteurs, mais aussi des difficultés dans les tâches qui requièrent un contrôle explicite ou top-down.

III- IMAGERIE MOTRICE ET TROUBLE DE L'ACQUISITION DES COORDINATIONS

1. Les paradigmes d'imagerie motrice comme investigation de l'intégrité des modèles internes de l'action

Comme nous l'avons vu précédemment, une des hypothèses étiologiques du TAC propose l'idée d'un déficit de modèle interne. Ceci impacte alors les capacités de contrôle moteur et d'apprentissage de ces sujets, qui ont des difficultés à générer des modèles internes.

Par ailleurs, les nombreuses similitudes entre mouvements imaginés et exécutés ont mené les chercheurs à supposer que l'imagerie motrice correspondrait à la copie d'efférence d'un mouvement. Il serait alors possible d'avoir un accès conscient à celle-ci car le mouvement réel est inhibé. Les capacités d'imagerie motrice reflèteraient ainsi la possibilité de générer des modèles internes du contrôle moteur (Williams et al., 2008). L'imagerie motrice permet donc, non seulement d'aider le développement des habiletés motrices, mais elle représente aussi la capacité de planifier un mouvement et d'utiliser le modèle interne direct afin de prédire les conséquences de celui-ci avant même que le feedback sensorimoteur ne soit disponible (Reynolds et al., 2015).

C'est pourquoi, les chercheurs utilisent les paradigmes d'imagerie motrice afin d'évaluer le contenu des modèles internes. Les paradigmes couramment employés sont la chronométrie mentale et la rotation mentale.

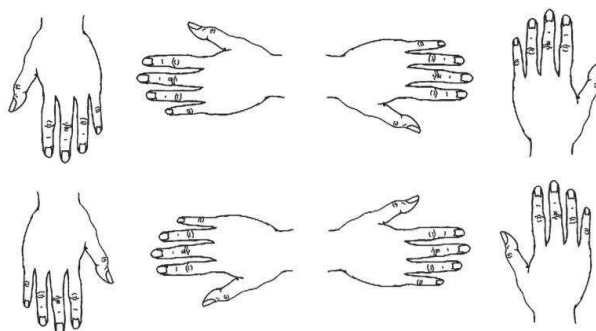
2. Evaluation des capacités d'imagerie motrice

Il existe différentes épreuves afin d'évaluer les capacités d'imagerie motrice chez les individus. Ces tests font référence aux paradigmes de chronométrie mentale ou de rotation mentale et sont les suivants : Hand Rotation Task (HRT), Visually Guided Pointing Task (VGPT) et le Movement Imagery Questionnaire (MIQ-RS)

2.1. *Hand Rotation Task (HRT)*

Les premières études réalisées sur la rotation mentale viennent de Shepard et Metlzer (1971) et se basaient sur des figures de cubes en 3D. Une dizaine d'années plus tard, d'autres chercheurs ont fait évoluer la tâche en remplaçant ces figures par des segments corporels dont il fallait juger de la latéralité.

Cette épreuve de rotation de mains est une des plus utilisées pour évaluer les capacités d'imagerie motrice et fait appel au paradigme de jugement de latéralité. Il est présenté aux sujets des photographies de mains dont ils doivent donner la latéralité, et ceci le plus vite et le plus précisément possible. Ces mains peuvent être présentées sous divers angles de rotation (0 à 180°) et sous différentes vues (vue palmaire et vue dorsale). La tâche requière l'utilisation de l'imagerie motrice lorsque les sujets imaginent leurs propres mains tourner afin d'exécuter la position présentée. (Butson, Hyde, Steenbergen, Williams ; 2014)



Images de mains droites et gauches avec quatre orientations différentes

Il est cependant difficile de démontrer que les sujets ont bien recours à l'imagerie motrice afin de résoudre la tâche et non à l'imagerie visuelle. Cette dernière consisterait à effectuer une rotation de la main présentée et non à s'imaginer tourner la sienne. Les chercheurs ont donc tenté de mettre en évidence l'utilisation de l'imagerie motrice lors de cette tâche en se basant sur les contraintes biomécaniques des mouvements réels. En effet, les temps de réponses des sujets dépendent de la posture de celui-ci et diffèrent selon l'orientation des mains présentées. Ils postulent que si les sujets ont leur paume de main vers le bas, les réponses aux stimuli présentés en vue dorsale seront plus rapides que pour la vue palmaire, grâce à la congruence posturale (Ter Horst et al., 2010). De plus, il sera plus facile d'effectuer une rotation de main en direction médiale que latérale, c'est pourquoi les chercheurs s'attendent à des réponses plus rapides et plus précises pour des mains présentées en rotation médiale (Butson et al., 2014). Enfin, le nombre d'axes de rotation est déterminant

quant à l'utilisation ou non de l'imagerie motrice. En effet, un seul axe de rotation entrainera l'utilisation d'une autre stratégie que l'IM, comme l'utilisation de l'orientation des doigts et du pouce. Au contraire, la présence de plus de deux axes de rotation engageront le sujet dans une stratégie d'IM.

Ainsi, pour cette épreuve de rotation de main, les temps de réponses des sujets peuvent varier selon différents points comme la posture du sujet, les contraintes biomécaniques ou le nombre d'axes de rotation nécessaires, ce qui nous permet de savoir si le sujet a eu recours à l'imagerie motrice ou non.

Ce test présente néanmoins une certaine limite dans la mesure où l'interprétation des résultats doit prendre en compte le développement cognitif du participant ce qui donne une limite d'âge minimum pour l'administration de ce test.

2.2. *Visually Guided Pointing Task (VGPT)*

Cette tâche est une épreuve de pointage et fait appel au paradigme de chronométrie mentale qui implique l'utilisation explicite de l'IM (Ferguson et al., 2015).

Pour cette épreuve, il est présenté aux participants cinq feuilles de papier (format A4) sur lesquelles se trouvent une ligne verticale de 80 mm sur la gauche et une cible de forme carrée sur la droite, à 150 mm. Chaque feuille sera composée d'une cible de taille différente (2.5 mm, 5 mm, 10 mm, 20 mm et 40 mm) représentant cinq niveaux de difficultés respectivement décroissant.



Visually Guided Pointing Task : taille de cible 10mm

Il est demandé aux sujets d'effectuer des mouvements de pointage avec un stylo du bout de la ligne verticale vers le centre de la cible et de revenir vers l'autre bout de la ligne de la même façon. Ceci doit être effectué cinq fois, le plus vite et le plus précisément possible. Le sujet effectue cette tâche sous deux conditions : en réel et en imagerie. Le temps pour réaliser la tâche est mesuré dans les deux cas. Avant chaque tâche, une démonstration est

effectuée. Le sujet peut aussi réaliser un essai d'entraînement sur la cible la plus large, afin de s'assurer de la bonne compréhension des consignes. Pour la partie en imagerie, il est demandé aux sujets de « s'imaginer le mouvement dans sa tête » et de « se sentir le réaliser ». Il est attendu que la loi de Fitts soit respectée sous les deux conditions (Ferguson et al, 2015).

Lors de cette tâche, les paramètres du contrôle moteur comme la vitesse, la force ou l'amplitude de mouvement sont indispensables afin d'atteindre la cible le plus précisément possible. En plus de ces facteurs, le sujet doit compter le nombre d'aller-retour effectués engageant alors la mémoire de travail.

2.3. Movement Imagery Questionnaire - Revised Second version

Afin d'évaluer au mieux les capacités d'un sujet pour imaginer un mouvement et savoir dans quel domaine il est le plus performant, Hall et Pongrac¹ (1983) ont initialement élaboré le Movement Imagery Questionnaire (MIQ). Celui-ci a ensuite été révisé (Movement Imagery Questionnaire - Revised) et traduit en français par Hall et Martin² (1997). Cependant, ce dernier questionnaire nécessite un certain niveau d'habiletés motrices et de coordination (sauts par exemple) et ne permet pas sa passation à des sujets ayant des difficultés motrices. C'est pourquoi, une nouvelle version de ce questionnaire a été réalisée (MIQ-RS) par Gregg et al.³ (2010). Il a ensuite été traduit et validé en français (Loison et al., 2013).

Ce questionnaire est composé de deux échelles : une échelle visuelle qui évalue l'imagerie mentale visuelle, et une échelle kinesthésique, qui évalue l'imagerie mentale kinesthésique. 14 items sont administrés dont 7 en référence à l'imagerie kinesthésique et 7 à l'imagerie visuelle. Pour chaque échelle, les actions à réaliser sont les mêmes et impliquent des mouvements des membres supérieurs, inférieurs, de tout le corps ou des actions de la vie quotidienne.

¹ In Hall, C. R., & Pongrac, J. (1983). *Movement imagery: questionnaire*. University of Western Ontario Faculty of Physical Education.

² In Hall, C. R., & Martin, K. A. (1997). Measuring movement imagery abilities: A revision of the Movement Imagery Questionnaire. *Journal of mental imagery*.

³ In Gregg, M., Hall, C., & Butler, A. (2010). The MIQ-RS: a suitable option for examining movement imagery ability. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 7(2), 249-257.

Pour chaque item, l'examineur décrit précisément le mouvement que le sujet doit effectuer. Celui-ci l'exécute réellement puis l'imagine soit visuellement soit en le ressentant (selon l'échelle). Le sujet estime ensuite le niveau de difficulté ou de facilité de cette tâche. Sept niveaux de réponses sont possibles allant de très difficile à visualiser ou ressentir à très facile. (Annexe I)

Ce questionnaire est très utile afin d'évaluer les capacités d'imagerie motrice d'un patient et de proposer des exercices de rééducation, par cette technique d'imagerie, les plus adéquats possible.

3. Les capacités d'imagerie motrice chez le sujet TAC

Grâce aux liens étroits découverts entre l'imagerie motrice, le contrôle moteur de l'action et l'hypothèse étiologique d'un déficit de modèles internes, il est possible de supposer que les sujets ayant un TAC sont en difficulté pour réaliser des tâches en condition d'imagerie. Cette hypothèse a été vérifiée et validée par les études de plusieurs chercheurs. Ces derniers ont regardé si les enfants TAC étaient capables d'accéder à l'imagerie et si leurs capacités d'imagerie présentaient un lien avec leur niveau de difficultés motrices.

3.1. Capacités d'utilisation de l'imagerie motrice

Le fait de savoir si les sujets TAC sont capables d'utiliser l'imagerie motrice est crucial. En effet l'imagerie motrice pourrait constituer une technique d'intervention pour améliorer le contrôle moteur et la génération des modèles internes de l'action. Deux paradigmes ont été principalement utilisés afin d'explorer cette question : le paradigme de chronométrie mentale, faisant appel à la loi de Fitts, ainsi que le paradigme de rotation mentale.

Paradigme de chronométrie mentale : étude de la loi de Fitts chez les enfants TAC

Afin d'étudier la nature de l'imagerie motrice et la structure des modèles internes des enfants TAC, il leur a été administré des épreuves impliquant la loi de Fitts. Dans cette épreuve, la relation entre la taille de la cible, reflétant la difficulté de la tâche, et la durée du mouvement est étudiée. Si les sujets font appel à l'IM, la loi de Fitts devrait être appliquée pour les mouvements imaginés et exécutés. Ceci révélerait alors la capacité de produire un modèle interne. (Noten et al., 2014).

Les résultats de l'étude de Wilson et al. (2001), révèlent que sur l'épreuve VGPT, les enfants TAC obéissent bien à la loi de Fitts en condition réelle. Ceci n'est cependant pas retrouvé pour la condition d'imagerie où la durée de leur mouvement est plus rapide qu'en situation d'exécution réelle. Il n'y a donc pas de corrélation entre la durée des mouvements imaginés et exécutés, contrairement aux sujets contrôles.

Ainsi, les difficultés d'imagerie motrice sont bien réelles chez les enfants TAC, notamment lorsque la difficulté de la tâche s'accroît et leurs compétences dans ce domaine sont liées à leurs compétences en motricité (Noten et al., 2014).

Paradigme de rotation mentale : épreuve de rotation de main (« *Hand Rotation Task* »)

Reynolds et ses collaborateurs (2015) proposent une étude afin d'explorer les capacités d'imagerie motrice des enfants avec et sans TAC. Pour cela ils ont eu recours au paradigme de rotation mentale et notamment l'épreuve de rotation de mains. Leur but était d'évaluer leur précision de réponse et sa conformité avec les contraintes biomécaniques du corps. Leurs hypothèses de départ étaient les suivantes :

- Les enfants TAC présenteraient un déficit d'utilisation de l'imagerie motrice, reflétant des réponses plus lentes et moins précises que les sujets contrôles
- Les différences observées entre les deux groupes (contrôles et TAC) seraient plus grandes pour les réponses lors de la tâche en vue palmaire et pour les tâches de complexité plus élevée

Tout d'abord, les résultats révèlent que les deux groupes d'enfants sont capables d'utiliser l'imagerie motrice afin de résoudre la tâche. Leurs réponses montrent d'autre part qu'ils suivent les contraintes biomécaniques et posturales du mouvement réel car ils sont moins rapides lorsque les mains sont présentées avec une orientation peu conforme. Cependant, il a été observé que les sujets TAC étaient tout de même plus en difficultés pour effectuer une rotation mentale de la main lorsque les contraintes biomécaniques sont augmentées.

Ensuite, il est révélé qu'avec l'augmentation de la difficulté de la tâche, les performances du groupe TAC deviennent plus lentes et moins précises que le groupe contrôle, et que les différences entre les deux groupes s'accroissent.

Par ailleurs, grâce aux instructions d'IM, tous les enfants ont pu répondre plus vite et plus précisément la seconde fois. Les enfants ayant un score au M-ABC entre le 6^{ème} et le 15^{ème} percentile sont significativement plus précis en suivant les instructions.

Enfin, pour Williams et al. (2008), des réponses peu précises à l'épreuve de rotation de mains souligne un plus grand déficit d'imagerie motrice que si les réponses sont lentes mais précises, où l'IM est utilisée mais à vitesse plus réduite. Ils postulent notamment que plus le trouble est sévère, plus l'enfant se retrouve en difficultés dans les tâches d'IM.

Ainsi, la majorité des recherches sur l'IM soutiennent l'hypothèse que les enfants TAC sont capables d'accéder à des stratégies d'IM pour des tâches simples, avec néanmoins des réponses moins efficaces comparé aux sujets contrôles, et notamment lorsque la complexité de la tâche augmente. De plus, l'effet des contraintes biomécaniques dans le groupe TAC reflète leurs capacités réduites pour réaliser des rotations mentales. Enfin, aux vues des résultats, les enfants sont capables d'améliorer leurs performances par des instructions d'IM. Ceci laisse donc supposer qu'une application clinique de cette technique d'IM pourrait être envisagée afin d'améliorer le développement moteur de ces enfants. (Reynolds et al., 2015)

Il est cependant nécessaire de regarder les conclusions de certaines études avec précautions car elles peuvent présenter des résultats contradictoires. En effet, il est difficile d'évaluer les stratégies d'IM utilisées et de savoir si les réponses présentées par les sujets reflètent bien le processus d'IM. Il a été observé des différences sur plusieurs points entre les études : Utilisation de un ou deux axes de rotation lors de l'épreuve, le nombre d'étapes de rotations, l'utilisation ou non d'instructions d'imagerie motrice, vision ou non des mains, méthode d'analyse

3.2. Les différents composants de l'IM chez le sujet TAC (force, timing prédictif)

Les chercheurs se sont questionnés afin de savoir si l'IM pouvait se décomposer en plusieurs composants.

Decety et ses collaborateurs ont révélé l'existence d'une corrélation significative entre la durée requise pour parcourir une certaine distance en marchant et celle pour réaliser cette même distance mais en condition de simulation de marche. Il a ensuite été demandé aux sujets

de réaliser une seconde fois cette expérimentation mais en portant dans chaque condition (réelle et simulée) un sac à dos de 25kg. La durée de marche en condition de réalisation n'est pas affectée par l'addition du poids. La durée en simulation est cependant systématiquement augmentée. Cette différence observée à l'ajout d'un poids est justifiée par le fait que nous associons l'augmentation de poids à l'augmentation de la durée de nos mouvements. Ces résultats nous permettent donc de pouvoir décompenser l'imagerie motrice en sous-composants. (Wilson et al., 2001)

En se basant sur ces découvertes, Wilson et al. (2001) ont réalisé une étude sur des enfants TAC avec un score au M-ABC inférieur au 15^{ème} percentile. Ils ont mesuré la durée des mouvements imaginés et réels par le VGPT. Ils ont ensuite ajouté un poids de 200g au stylo et reconduit l'épreuve dans les deux conditions (réelle et simulée)

Les résultats montrent que les sujets contrôles répondent comme ce qui était attendu :

- ils diminuent leur vitesse pour les cibles plus petites et font preuve de plus de précision ;
- la loi de fitts est respectée en condition réelle et en condition d'imagerie, et ceci avec ou sans charge ajoutée ;
- la durée des mouvements réels n'est pas atteinte avec l'ajout du poids, les enfants ont juste généré plus de force ;
- le poids ajouté a ralenti la durée de leur mouvement en imagerie.

Ceci nous montre que le calcul de la force et du temps, nécessaires à la réalisation du mouvement, sont indépendants en condition d'imagerie.

Les sujets TAC quant à eux montrent des réponses similaires aux sujets contrôles en condition réelle avec la loi de fitts respectée, et une durée de mouvement non affectée par l'addition du poids. Cependant, en imagerie, les mouvements ne répondent plus à la loi de fitts. La taille de la cible et donc la précision nécessaire, ne change pas la durée de leur mouvement en simulation. L'addition du poids ne ralentit pas la durée des mouvements imaginés. Ceci nous révèle que les enfants TAC présentent un déficit au niveau des processus qui requièrent de se représenter la force et le temps qui composent le mouvement et ses différentes séquences.

En conclusion, on observe chez le sujet TAC que le mouvement réel obéit à la loi de Fitts mais pas le mouvement imaginé et que l'addition du poids ne ralentit pas leur durée de mouvement en imagerie, contrairement aux sujets contrôles.

3.3. Lien entre les difficultés motrices du TAC et leurs capacités d'imagerie motrice

Après avoir démontré que les enfants TAC sont capables d'accéder à l'IM, il est intéressant de se demander s'il existe une relation entre leur niveau de déficit moteur et leurs capacités d'imagerie motrice.

Williams et ses collaborateurs soutiennent cette idée de l'existence d'une relation. Ils ont étudié et comparé les performances d'imagerie motrice chez un groupe d'enfants TAC ayant un score inférieur au 5^{ème} percentile au M-ABC et un groupe ayant un score entre le 6^{ème} et le 15^{ème} percentile. Ils ont découvert qu'il existe des différences de performance entre ces deux groupes.

Pour venir étayer cette étude, Williams, Thomas, Maruff et Wilson (2008) ont eux aussi réalisé une étude dont le but était de déterminer s'il existe une différence de performance d'IM entre des enfants ayant un TAC sévère et des enfants ayant un TAC moyen, et si elles diffèrent avec un groupe contrôle. Pour cela, ils ont eu recours au paradigme de rotation mentale en impliquant une épreuve avec les mains et une avec l'ensemble du corps. Cependant, il est possible que les enfants n'utilisent pas implicitement l'IM. Les chercheurs leur ont donc administré les épreuves deux fois : la première avec pour seule instruction de donner la latéralité de la main, la deuxième en leur demandant explicitement d'imaginer leur propre main. Cette deuxième condition permettra de voir si les enfants présentent des variations dans leur réponse. L'hypothèse de cette étude est que les enfants ayant un TAC sévère montreront de plus grandes difficultés en imagerie motrice que les enfants avec un TAC moyen ou les contrôles.

Les résultats révèlent ainsi que les capacités d'IM des enfants TAC sont liées à leur déficit moteur. En effet, les sujets ayant un TAC sévère sont moins performants que les sujets contrôles dans les tâches d'IM et manifestent un manque de précision. En revanche, les enfants ayant un TAC moyen peuvent réaliser des tâches simples d'imagerie, mais ne le sont plus lorsqu'elles deviennent plus complexes. Par ailleurs, ils peuvent tirer bénéfice des instructions d'IM contrairement aux TAC sévères.

Ainsi, Williams et al. (2008) affirment qu'il existe bien un lien entre le niveau de déficit moteur des sujets TAC et leurs capacités d'IM. Ces résultats viennent aussi soutenir l'hypothèse du déficit de modèle interne qui affecterait tout un ensemble de mouvements chez l'enfant ayant un TAC sévère, mais qui serait restreint aux tâches motrices complexes pour des enfants ayant un TAC moyen.

Cependant, aux vues de ces résultats, les chercheurs se questionnent afin de savoir si le déficit d'utilisation des modèles internes a un rôle de causalité dans les déficits moteurs des enfants ou s'il s'agit simplement d'un symptôme. Si ce déficit de modèles internes est un symptôme, nous nous attendrions à ce que les capacités d'IM s'améliorent en même temps que les performances motrices. Pour clarifier cette question il serait intéressant d'effectuer des études complémentaires.

IV- CADRES D'UTILISATIONS ET PLASTICITE CEREBRALE

Dans cette partie, nous allons voir que l'imagerie motrice est une technique de plus en plus utilisée tant dans les domaines du sport et de la musique que dans la rééducation médicale et paramédicale. Nous verrons aussi l'implication de l'imagerie motrice dans la plasticité cérébrale.

1. Cadre normal

Jackson et ses collaborateurs postulent que l'entraînement mental et sa répétition sur une tâche spécifique permet d'accéder consciemment aux processus inconscients impliqués dans l'apprentissage d'une habileté motrice (Lotze & Halsband ; 2006) Les techniques d'imagerie peuvent ainsi venir compléter les entraînements des athlètes ou des musiciens, par exemple.

1.1. *Apprentissage et amélioration des performances motrices*

L'efficacité de l'IM sur l'apprentissage et l'amélioration des performances motrices reste un sujet n'ayant pas acquis de consensus de la part des différents chercheurs s'y intéressant.

En effet, certains auteurs ont démontré que l'IM permettait :

- un gain de force musculaire,
- une élévation de la vitesse d'exécution,
- une amélioration de la coordination segmentaire,
- une meilleure stabilité posturale
- une amélioration des habiletés motrices

Cependant, d'autres chercheurs n'ont pas retrouvé d'efficacité, ou d'amélioration, avec un travail en IM. Ces résultats moins positifs seraient à mettre en lien avec :

- le type d'IM utilisé : l'imagerie kinesthésique paraît plus adaptée que l'imagerie visuelle, qui positionne le sujet en observateur
- la faible durée de la phase d'apprentissage
- le niveau d'expertise élevé des sujets dans l'activité

- l'IM serait à utiliser en début d'apprentissage
- un travail en IM qui se rapproche le plus possible des conditions réelles

Ces différences retrouvées seraient donc à rapprocher des différences méthodologiques retrouvées entre les études. Ainsi, la pratique de l'IM se doit de respecter certaines règles et principes afin d'obtenir des résultats optimaux (Grangeon, Guillot & Collet ; 2009)

1.2. Sport

Depuis quelques décennies, l'entraînement mental est intégré aux entraînements des sportifs. Les entraîneurs ont recours à diverses techniques comme l'imagerie visuelle, l'imagerie motrice ou l'auto-instruction, afin d'améliorer les performances motrices ou les apprentissages moteurs.

Les chercheurs ont identifié différents éléments venant influencer les effets de l'entraînement mental sur les performances motrices : le niveau d'habileté motrice du sujet et ses capacités d'imagerie, les caractéristiques de la tâche proposée, et le recours à la perspective interne ou externe. (Munzert et al., 2009)

Van Gyn et al. (1990) ont réalisé une étude qui a démontré que l'entraînement mental permettait d'améliorer les performances des athlètes en sprint. En effet, le groupe ayant reçu un entraînement physique associé à un entraînement mental montre une amélioration significative dans leur performance en sprint, contrairement au groupe ayant seulement reçu l'entraînement physique.

L'imagerie motrice est aussi une technique utilisée pour la réhabilitation des blessures dans le sport. Des effets positifs ont été soulignés sur la récupération musculaire après une entorse et sur la récupération de la force du genou après une blessure des ligaments croisés antérieurs. Ces effets de l'entraînement mental dans la récupération après une blessure reposent sur l'amélioration de la production de force (Munzert et al., 2009).

L'IM se révèle ainsi être une technique intéressante dans la pratique du sport, permettant une amélioration des performances motrices de l'athlète. Elle améliore notamment la récupération après une blessure, permettant au sportif de revenir au plus vite à son meilleur niveau.

1.3. *Musique*

Tout comme les athlètes, les musiciens sont susceptibles d'avoir recours à l'imagerie motrice. Il s'agit en effet d'une technique qui leur permettrait d'améliorer leurs performances en simulant une expérience subjective des sorties sensorimotrices et/ou des actions associées. (Brown, Palmer ; 2013)

Cette technique est essentiellement retrouvée chez des musiciens professionnels et est utilisée en complément d'une pratique réelle. Le sujet peut donc répéter mentalement les passages les plus difficiles techniquement et s'entraîner malgré l'absence de l'instrument ou l'incapacité physique d'en jouer. La simulation en imagerie d'une pièce musicale demande au participant de penser au son idéal de la performance souhaitée ce qui guiderait le mouvement et permettrait l'anticipation de la technique (Lotze ; 2013).

De plus, il a été démontré que, chez les musiciens, la répétition en imagerie d'une pièce musicale améliore la performance ultérieure. Ce type d'entraînement permettrait aussi une meilleure performance au niveau de la qualité tonale et de l'encodage en mémoire, comparé à l'entraînement physique seul (Lotze ; 2013)

L'imagerie dans le domaine de la musique ne requière pas spécifiquement les aspects moteurs, somatosensoriels, auditifs, ou visuels mais les intègre tous. Il s'agit donc d'une technique multimodale dans la pratique musicale.

2. Cadre pathologique

Une lésion du SNC peut s'avérer invalidante jusqu'à entraîner une impossibilité totale d'effectuer un quelconque mouvement volontaire. De même, une atteinte périphérique (musculaire ou articulaire) aura les mêmes conséquences et empêchera la mobilisation du segment corporel atteint. La récupération motrice ne peut être optimale qu'avec une possibilité de s'exercer le plus possible en augmentant le temps et l'intensité de la rééducation. Cependant, ceci n'est pas toujours réalisable. Afin de réduire au maximum le coût de l'effort physique d'une rééducation, l'IM peut être une technique alternative de rééducation, complémentaire aux programmes classiques. (Grangeon et al., 2009)

2.1. Accident Vasculaire Cérébral (AVC) et hémiplégié

Les études sur l'utilisation de l'IM dans le cadre d'un AVC sont nombreuses dans la littérature. La répétition mentale intégrée à la rééducation post-AVC a montré des effets positifs notamment sur la récupération fonctionnelle, et ce quel que soit le degré d'atteinte (Grangeon et al., 2009). Les entraînements par IM proposés aux patients hémiplegiques ont, en général, une fréquence de 3 séances par semaine à plusieurs par jour, sur une durée de 2 à 6 semaines.

Néanmoins, afin que la récupération motrice soit la plus optimale possible, il est nécessaire que la rééducation par IM s'effectue en phase de rééducation subaiguë et chronique. En effet, lors de la phase aiguë le plus important chez ces patients est de maintenir les fonctions vitales et prévenir les complications liées à l'immobilité (Grangeon et al., 2009). En revanche, en phase chronique il est démontré que de nombreux objectifs peuvent être atteints :

- La rééducation posturale et la restauration de l'équilibre, qui s'accompagnent d'une amélioration de l'utilisation de la jambe atteinte.
- La restauration des fonctions motrices du membre supérieur avec une récupération de la préhension, un gain de force, une réduction du temps de mouvement ainsi qu'une amélioration de la précision graphique
- Le renforcement moteur et la rééducation de la marche où sont observées une amélioration de la vitesse d'exécution et une stabilisation des résultats
- L'adaptation à l'environnement sur des tâches de la vie quotidienne et qui permet, par la suite, un transfert positif sur d'autres tâches simples similaires

Cependant, malgré les nombreux résultats positifs de l'entraînement mental par imagerie motrice avec des patients hémiplegiques, un consensus n'est toujours pas établi quant à son efficacité. En effet, on peut retrouver des divergences entre les études selon la tâche à travailler ou encore le nombre de séances proposées. De plus, une lésion de certaines zones cérébrales, comme le lobe pariétal, entraînent une altération des capacités d'IM limitant alors son utilisation en rééducation. (Grangeon et al., 2009)

2.2. Douleurs neuropathiques

Dans ce cadre, l'utilisation de l'IM est à but antalgique. En effet, Sordoni et al. (2002) ont montré que l'IM permettait de diminuer la perception de la douleur. Pour cela, les patients s'imaginent mobiliser leur membre douloureux sans prendre en compte la blessure et les sensations douloureuses associées.

Moseley (2007) a quant à lui effectué une étude avec quatre patients paraplégiques ayant des douleurs neuropathiques. Il a démontré qu'après trois semaines d'entraînement par IM les patients présentaient une réduction majeure de leurs douleurs neuropathiques.

Par ailleurs, certains auteurs émettent l'hypothèse de l'existence d'un lien entre la réorganisation corticale de l'aire somesthésique pariétale, contrôlant la perception du membre lésé, et celle d'une douleur neuropathique. L'IM viendrait limiter cette réorganisation corticale permettant ainsi la réduction de la douleur. (Grangeon et al., 2009)

Cependant, des résultats contradictoires se retrouvent entre les études. Il est possible de les attribuer aux caractéristiques de la population étudiée et notamment aux différences de douleur entre les patients. Des travaux supplémentaires seraient intéressants afin de venir compléter les connaissances actuelles sur le rôle de l'IM dans la nociception (Grangeon et al., 2009).

2.3. Membres fantômes

Les patients amputés du membre supérieur présentent des douleurs importantes de leur main ou de leur bras, même plusieurs années après la désafférentation. Il est possible de l'expliquer par la réorganisation cartographique corticale qui survient. En effet, la zone cérébrale correspondant à la représentation du membre amputé est colonisée par les neurones de la zone adjacente (comme celle de la représentation de la bouche) provoquant alors des troubles de la perception et l'apparition du membre fantôme. Par exemple, une stimulation tactile buccale engendrera une perception du membre fantôme. Ainsi, plus la colonisation est grande, plus la douleur du membre fantôme est importante.

Suite à ces observations, il paraît intéressant pour les chercheurs de recourir à l'IM afin d'apprendre aux patients amputés à récupérer une représentation mentale active du membre amputé et d'atténuer les douleurs en limitant la colonisation (Grangeon et al., 2009). L'IM aurait ainsi un effet sur la réorganisation corticale.

2.4. *Maladie de Parkinson*

La maladie de Parkinson résulte d'une dégénérescence des voies dopaminergiques nigrostriatales. Les sujets atteints par cette maladie montrent une perturbation de l'initiation du mouvement. Ceci peut être expliqué par un déficit de génération d'états internes. (Munzert et al., 2009).

L'IM étant un état dans lequel on génère la planification d'un mouvement sans son exécution effective, on pourrait donc supposer que les patients Parkinsoniens présentent un déficit d'IM. Quelques études viennent confirmer cette hypothèse et ont apporté la preuve d'une réduction de la capacité à simuler des mouvements du corps, et notamment des difficultés de rotation mentale des parties du corps (Munzert et al., 2009).

De plus, des chercheurs ont montré que, lors d'une tâche d'IM, les patients hémiparkinsoniens présentaient une diminution de l'excitabilité des aires motrices dans l'hémisphère affecté. Par ailleurs, de récentes recherches soulignent que les patients parkinsoniens présentent un déficit dans les processus sensoriels et notamment dans les feedbacks sensoriels. Or, l'IM, et les processus de planification motrice, dépendent des afférences proprioceptives. (Munzert et al., 2009)

Ainsi, ces études révèlent des difficultés réelles chez les patients parkinsoniens tant dans les processus de planification motrice que d'IM. On peut donc supposer que l'IM pourrait être une technique appliquée à la prise en charge de la maladie de Parkinson.

2.5. *Dystonie, crampe de l'écrivain*

La crampe de l'écrivain est une forme de dystonie spécifique à la tâche d'écriture. Elle est caractérisée par des contractions involontaires du membre supérieur lors d'une production écrite du sujet. Ceci engendre de mauvaises postures, des douleurs et une perte de contrôle du stylo.

Tumas et Sakamoto (2009) ont effectué une étude sur les caractéristiques de la production d'un mouvement réel et imaginé chez des patients souffrant de cette forme de dystonie. Les résultats de leur étude révèlent des difficultés motrices avec un ralentissement moteur lors de la production écrite en réel ou en imagerie, comparé au groupe contrôle.

Cette étude a permis de démontrer que la loi de fitts n'est pas conservée en condition d'imagerie lors d'un geste de production écrite. Mais aussi, la présence d'anomalies dans les processus mentaux de planification motrice du geste d'écriture. Ces auteurs émettent l'hypothèse que le cortex moteur primaire, les aires motrice préfrontales et les aires somato-sensorielles présenteraient des dysfonctionnements, notamment dans les régions impliquées dans l'IM.

3. Cadre des troubles psychomoteurs

3.1. *La dysgraphie*

La dysgraphie est un trouble de l'écriture dont l'atteinte peut se situer au niveau de la qualité ou de la vitesse de production de celle-ci. L'étiologie de ce trouble n'est pas réellement définie de par les nombreuses régions cérébrales impliquées et la complexité des processus perceptivo-moteurs.

Un auteur s'est récemment intéressé à l'effet de l'IM sur la dysgraphie. En effet, la relation entre l'IM et les théories du contrôle moteur laisse penser que cette technique pourrait venir améliorer certaines caractéristiques de l'écriture par un entraînement mental à la production de lettres et de mots. Ceci permettrait d'amener l'enfant à un meilleur ressenti des différents paramètres du mouvement d'écriture (spatiaux, temporels, kinesthésiques), d'améliorer leur contrôle moteur proactif et ainsi d'atténuer leur dysgraphie (Puyjarinet, 2015).

A partir de cette hypothèse, F. Puyjarinet (2015) a réalisé une étude afin de comparer les effets d'une approche métacognitive (méthode CO-OP), déjà validée, avec ceux de l'IM. Pour cela, il a réparti 51 enfants, âgés de 7 à 12 ans, en 3 groupes : un groupe IM, un groupe rééducation métacognitive (RM) et un groupe contrôle ne recevant aucun traitement. Le protocole s'étend sur 12 séances de 45 mn.

Les résultats de cette étude révèlent une amélioration importante de la qualité d'écriture pour les groupes IM et RM, mais pas pour le groupe contrôle. De plus, des différences significatives sont observées entre le groupe IM et le groupe contrôle et le groupe RM et le groupe contrôle. Il n'existe cependant pas de différence entre les groupes IM et RM ce qui souligne une efficacité similaire entre l'approche métacognitive et l'IM.

On peut supposer que cette réduction de la dysgraphie serait permise par une amélioration du contrôle proactif du mouvement d'écriture et donc du fonctionnement des modèles internes du contrôle moteur. Les sujets ont donc de meilleures capacités dans la prise de conscience des sensations kinesthésiques, proprioceptives et spatiales de l'action et dans l'anticipation des conséquences d'une action. (Puyjarinet, 2015)

Ainsi, ces résultats viennent soutenir l'hypothèse de l'utilisation de l'IM dans la prise en charge des troubles de l'écriture.

3.2. *Trouble de l'Acquisition des Coordinations (TAC)*

Ce trouble psychomoteur fait l'objet de nombreuses recherches depuis quelques décennies. Des chercheurs se sont notamment intéressés au recours à l'IM dans le but d'améliorer les performances motrices des enfants ayant un TAC. Wilson et al. (2002) proposent un modèle dont le but n'est pas de séparer les aspects moteurs et cognitifs de la présentation clinique du TAC. Ils décrivent les difficultés motrices observées chez ces enfants comme reflétant un déficit dans les processus de modèles internes, et notamment de copie d'efférence.

Malgré les études attestant d'un lien entre les difficultés motrices des enfants, les théories du contrôle moteur et l'IM, il s'agit de la seule étude venant éclairer la question de l'utilité de l'IM dans la prise en charge du TAC. Wilson et al. (2002) se proposent de comparer l'efficacité de l'IM à celle d'un programme traditionnel perceptivo-moteur chez des

enfants TAC. Ils émettent l'hypothèse que l'entraînement proposé en IM aurait une efficacité similaire à l'entraînement perceptivo-moteur.

Leur étude regroupe 18 enfants, évalués à l'aide du Movement Assessment Battery for Children (M-ABC), et répartis en 3 groupes : 1) groupe IM, 2) groupe d'entraînement perceptivo-moteur, 3) groupe contrôle. Les enfants de chaque groupe reçoivent 5 entraînements de 60mn, pendant 5 semaines.

La comparaison des scores de chaque groupe au M-ABC avant et après la prise en charge révèle que le groupe IM et le groupe perceptivo-moteur ont amélioré leurs scores, contrairement au groupe contrôle. De plus, si on regarde les résultats individuellement, la plupart des enfants ont amélioré leurs performances au M-ABC entre le pré et le post-test.

Ces résultats sont remarquables dans le sens où un protocole basé presque exclusivement sur de l'entraînement mental apporte des résultats similaires à un programme classique d'entraînement perceptivo-moteur. L'IM est donc une technique intéressante pour la prise en charge des difficultés motrices rencontrées dans le TAC

Cependant, il est nécessaire de regarder ces données avec précaution car 39% de l'échantillon présentaient un score au M-ABC normalo-faible. C'est pourquoi une étude est actuellement en cours afin de venir étayer ces résultats et apporter un niveau de preuve supplémentaire quant à l'efficacité de l'IM dans la prise en charge du sujet TAC. Cette étude actuelle est menée par Adams et al. (2016) sur des enfants de 7 à 12 ans ayant des difficultés motrices. L'objectif est de comparer l'efficacité de l'IM à celle d'une technique métacognitive (CO-OP) déjà validée dans la prise en charge du TAC.

4. Imagerie motrice et plasticité cérébrale

La plasticité est la capacité du tissu nerveux à modifier sa connectivité tant au niveau structural que fonctionnel. Son rôle est alors d'organiser ou de réorganiser les réseaux neuronaux dans le développement et le fonctionnement de l'organisme. L'environnement peut intervenir dans ces modifications par un excès ou une carence de stimulation.

On peut supposer que l'IM interviendrait sur la plasticité cérébrale et sur la réorganisation corticale. Son utilisation en parallèle des techniques de rééducation classiques permettrait ainsi l'apprentissage de nouveaux mouvements, l'amélioration des performances motrices ou la restauration de certaines fonctions motrices. La modification des représentations motrices induite par l'IM viendrait modifier ou renforcer les schémas moteurs du sujet (Grangeon et al., 2009).

L'IM pourrait aussi avoir comme rôle de minimiser la réorganisation de la carte perceptive, de conserver le contrôle des membres inférieurs dans l'attente d'une orthèse ou encore de diminuer les douleurs neuropathiques (Grangeon et al., 2009). Des études laissent supposer qu'il y aurait la possibilité d'augmenter le nombre de synapses ou d'établir de nouvelles connexions synaptiques à partir de bourgeons pré-existants. Ainsi, cette production de nouvelles connexions viendrait compenser la perte neuronale consécutive à une lésion du SNC ou à une maladie neuro-dégénérative. L'IM, qui se révèle être un outil d'apprentissage, pourrait donc être utilisée afin de favoriser leur stimulation.

Ainsi, à l'instar de la pratique physique, l'imagerie motrice interviendrait sur la plasticité cérébrale par une réorganisation à double niveaux :

- Une plasticité synaptique : intervenant sur les voies fonctionnelles pré-existantes
- Une plasticité anatomique : par la formation de nouveaux réseaux neuronaux

PARTIE
PRATIQUE

Mon intérêt pour l'imagerie motrice m'a amenée à me demander quel apport cette technique pouvait avoir dans le cadre de la psychomotricité et notamment dans la rééducation du Trouble de l'Acquisition des Coordinations. Sur mon lieu de stage, un certain nombre d'enfants présentaient ce trouble, notamment Noah et Théo. Je me suis intéressée à leur problématique individuelle, leurs difficultés et leurs besoins afin de cibler au mieux les habiletés motrices pour chacun. Je leur ai ainsi proposé le protocole d'imagerie motrice pour la rééducation des troubles de l'équilibre de Noah et de la dysgraphie de Théo.

I- PROTOCOLE D'IMAGERIE MOTRICE

1. Les pré-tests

1.1. *Visually Guided Pointing Task (VGPT)*

Cette épreuve consiste à réaliser un mouvement de pointillage, avec un stylo, d'un trait vertical vers une cible carré, ceci sur 5 aller-retour.

L'administration de cette épreuve s'est réalisée en deux temps : en condition réelle puis en condition d'imagerie. Pour cette deuxième condition, le départ était prononcé par un signal top, et l'arrivée était marquée par l'ouverture des yeux. Chaque situation était chronométrée.

1.2. *Hand Rotation Task*

Lors de cette épreuve, nous présentions aux enfants des images de mains gauches et droites dans différentes orientations. Il leur était demandé de juger de la latéralité des mains le plus vite possible mais sans faire d'erreur. Les enfants étaient assis au bureau, les mains posées sur la table, la paume vers le haut, et recouvertes d'un tissu opaque. Cette position impliquait l'utilisation de 2 axes de rotation afin d'imaginer sa main dans la position présentée.

Cette épreuve devait être administrée deux fois : une première sans instruction et une deuxième avec pour instruction que l'enfant imagine sa propre main tourner afin de la positionner comme sur l'image présentée

2. Description du protocole

Le protocole d'imagerie motrice auquel j'ai eu recours intègre cinq étapes : un entraînement au timing prédictif, un temps de pleine conscience, une observation de vidéos, un temps d'imagerie motrice et une pratique réelle.

2.1. Entraînement au timing prédictif

Cet entraînement est effectué afin d'améliorer la précision de l'estimation temporelle et des habiletés en imagerie visuelle. Pour cela, il est proposé au patient un exercice d'imagerie visuelle. Le but étant que l'enfant imagine le trajet d'un objet et puisse prédire l'arrivée de celui-ci tant pour sa localisation que le temps nécessaire pour parcourir le trajet.

Actuellement, il existe deux études ayant eu recours à ce type d'exercice :

- Wilson et al. (2002) : ces derniers utilisent sur ordinateur une série de disques mouvants dont le sujet doit prédire l'arrivée.
- Puyjarinet (2015) : cet auteur a eu recours à un logiciel de rééducation des habiletés visuo-spatiales T.V Neurons, et plus précisément le jeu « les abeilles ».

N'ayant pas accès à ces logiciels, j'ai décidé d'adapter cet exercice de timing prédictif en condition réelle et non sur ordinateur. Pour cela, nous avons utilisé une balle que nous lançons à partir d'un point de départ. Les enfants observaient le trajet de la balle jusqu'au point d'arrivée. Les points de départ et d'arrivée étaient matérialisés par un plot. Ils devaient ainsi observer le trajet de la balle 3 fois. Il leur était ensuite demandé de fermer les yeux et de visualiser mentalement cette trajectoire. Je leur donnais un signal « top » comme repère de lancer de la balle. Les enfants devaient ouvrir les yeux lorsqu'ils estimaient que la balle avait atteint le plot d'arrivée. Nous leur donnions ensuite un feedback verbal (« trop tôt », « trop tard », « très bien ») afin qu'ils apprennent progressivement à ajuster leur vitesse mentale. Cet exercice était réalisé sur une dizaine de minutes.

Modifications apportées

Nous nous sommes rendu compte dès la première séance que le format de cet exercice ne convenait pas. En effet, il nous était difficile de donner à la balle une vitesse constante qui demandait une force d'envoi constante, ce qui s'avère compliqué. Afin de proposer un exercice le plus adapté possible, nous avons eu l'idée de recourir à un plan incliné, réalisé grâce à deux tapis et un support pour l'inclinaison de ceux-ci. Nous pouvions faire varier l'inclinaison de la pente, et donc la vitesse de la balle, en ajoutant ou en retirant des supports. La balle était ainsi lâchée en haut du plan incliné.

De plus, nous avons vite proposé aux enfants de taper sur une sonnette lorsqu'ils estimaient que la balle était arrivée au plot. En effet, ils pouvaient oublier d'ouvrir les yeux et la position les rendait passifs.



Dispositif pour l'entraînement au timing prédictif

2.2. Exercice de pleine conscience

A chaque séance et dans un deuxième temps, il était proposé aux patients un temps de pleine conscience, ou mindfulness sur une durée de 5 minutes.

Cet exercice est reconnu comme un moyen de régulation des ressentis des sensations corporelles. Le but de celui-ci est de préparer les enfants à porter leur attention sur différentes parties du corps en effectuant un « balayage corporel ». Il leur est demandé d'accueillir et d'analyser sans jugements les sensations corporelles ressenties, qu'elles soient positives ou négatives (chaleur, fraîcheur, fourmillements, picotements, absence de sensations ...). Cet exercice était réalisé assis sur une chaise

2.3. *Observation de vidéos*

Après l'exercice de pleine conscience, il était présenté aux enfants des vidéos de l'habileté choisie. Le contenu des vidéos devait être le plus proche possible des conditions réelles de pratique de l'enfant tant au niveau du matériel que du lieu.

Chaque vidéo était visionnée 4 fois au cours desquelles l'attention des enfants était portée sur des caractéristiques spécifiques, selon l'habileté. Nous développerons ces caractéristiques dans une autre partie.

2.4. *Imagerie motrice*

Après l'observation des vidéos, il était demandé aux enfants de fermer les yeux et de s'imaginer réaliser l'habileté choisie. Cette représentation mentale devait se rapprocher au maximum du contenu de la vidéo et impliquer la perspective interne, ou à la première personne.

Cet exercice d'imagerie était réalisé 3 fois : une fois avec instruction et deux fois sans instruction. Les enfants étaient installés assis sur la chaise.

Après ces trois temps d'imagerie, l'enfant était invité à produire en condition réelle l'habileté ciblée pour ensuite repartir sur un second temps d'imagerie et finir sur une dernière pratique.

3. Conditions nécessaires à une pratique bénéfique

3.1. *Le modèle PETTLEP*

Le modèle PETTLEP vient de Holmes et Collins (2001) qui se sont basés sur des recherches effectuées dans le domaine des neurosciences. Ce modèle se base sur l'idée de l'équivalence fonctionnelle entre action simulée et action réelle. Il s'agit d'un acronyme qui propose des éléments essentiels à respecter pour l'utilisation de l'imagerie motrice :

Physique : pour être efficace, l'imagerie doit impliquer tous les sens qui peuvent être engagés dans le mouvement réel ainsi que toutes les sensations kinesthésiques qui peuvent y être associées.

Environnement : afin d'accéder aux représentations motrices du mouvement réel, il est nécessaire que l'habileté choisie soit imaginée dans un environnement le plus similaire possible à l'environnement de la pratique réelle.

Tâche : la tâche imaginée et la tâche réelle doivent être le plus similaire possible. Il sera demandé à l'enfant de décrire ses sensations physiologiques et comportementales afin de s'assurer le recours à de l'imagerie kinesthésique.

Timing : les caractéristiques temporelles du mouvement réel doivent être respectées et conservées lors de l'imagerie pour permettre l'accès aux représentations motrices du mouvement.

Apprentissage (Learning) : le contenu de l'imagerie doit être adapté au stade d'apprentissage moteur de l'enfant. Celui-ci devra dans un premier temps penser davantage à la technique de l'habileté pour progressivement se concentrer sur les ressentis du mouvement.

Emotion : pendant l'imagerie, l'enfant doit expérimenter toutes les émotions associées à la performance. Il est possible d'observer les réponses émotionnelles lors de l'imagerie par les rythmes respiratoire et cardiaque.

Perspective : il est préférable que l'enfant ait recours à l'imagerie interne ou à la première personne, qui est une perspective proche de celle de la performance réelle.

3.2. *Caractéristiques pour une pratique bénéfique*

Afin d'organiser les modalités thérapeutiques de la pratique de l'IM en prise en charge, Schuster et ses collègues (2011) ont réalisé une méta-analyse et ont pu dégager les caractéristiques principales d'une pratique bénéfique. Cinq disciplines ont donc été étudiées (domaine éducatif, médecine, sport, psychologie, musique) et ont permis de faire ressortir quatre aspects fondamentaux pour une pratique optimale :

- L'IM doit être pratiquée en séance individuelle
- Les séances se déroulent sous la supervision d'un tiers et sont non-directives
- Une pratique réelle doit être proposée au patient en complément
- Il ne faut pas dépasser deux essais de visualisation par minute dans une même session d'entraînement, et une session ne doit durer plus de 20 minutes.

D'autres travaux sont venus par la suite compléter les aspects importants d'une pratique bénéfique et rajoutent différents points :

- Le cadre doit être bien défini afin de permettre au patient de travailler en IM avec des conditions proches des conditions réelles (même matériel, par exemple)
- Il est nécessaire de proposer au patient des phases d'observation de l'action à réaliser
- Les caractéristiques spatio-temporelles de l'habileté doivent être respectées au maximum
- Le patient doit se situer dans un niveau attentionnel optimal, ce qui peut nécessiter un exercice de relaxation en début de séance
- Il sera important, au préalable, d'évaluer les capacités d'imagerie initiales de l'enfant. Celles-ci nous permettront de nous appuyer sur des pré-requis afin de développer leur capacité de génération d'images mentales

3.3. Intégration au protocole

Afin d'obtenir un effet optimal d'une rééducation par l'imagerie motrice, j'ai tenté de mettre en pratique les différents éléments présentés ci-dessus.

Les composants du modèle PETTELP ont été intégrés et respectés au mieux dans les protocoles proposés aux patients. Les éléments « physique » et « environnement » ont été inclus en ayant recours à des vidéos d'une tierce personne et en mettant l'accent sur les sensations kinesthésiques et proprioceptives de l'action. Les éléments « tâche » et « timing » ont été montrés par les vidéos représentant l'habileté ciblée, que les enfants doivent s'imaginer réaliser en respectant la durée du mouvement réel. Pour l'élément « apprentissage », les habiletés proposées aux enfants correspondaient à leurs capacités motrices et différents niveaux leur étaient proposés. De plus, l'attention était portée dans un premier temps sur la technique puis sur les sensations kinesthésiques. L'élément « émotion » est intégré en demandant à l'enfant comment il se sent par rapport à ses productions. Enfin, l'élément « perspective » est proposé dans les vidéos réalisées à la première personne, lorsque cela est possible.

II- PROTOCOLE POUR LA PRISE EN CHARGE D'UNE DYSGRAPHIE

1. Présentation de Théo, [REDACTED]

A la maison

Théo est un enfant unique d'une maman d'origine algérienne. Il est peu autonome pour se laver, sa mère l'aide fréquemment. Plus jeune, il présentait quelques difficultés avec les lacets et boutons. Théo n'aime pas sortir de la maison et joue beaucoup sur internet.

Scolarité

Théo est scolarisé en CM2. En classe, il présente des difficultés de concentration. Il est décrit comme lent et peu autonome dans l'exécution de diverses activités écrites, qu'il ne termine pas en même temps que les autres élèves. De plus, il rencontre des difficultés pour s'organiser (oublis ou perte de matériel, devoirs non notés) et est peu attentif.

Il fait également du basket-ball en activité extra-scolaire.

Suivis : Théo bénéficie d'une prise en charge psychomotrice depuis la GSM, orthophonique depuis le CP et d'un suivi éducatif groupal.

1.2. Compte rendu pédiatrique – octobre 2013 (8 ans 9 mois)

Examen neurologique normal, équilibre unipodal bref

Comportement fluctuant durant la consultation.

Bilan psychométrique : WISC IV

ICV	IRP	IMT	IVT
86	92	79	81

Etant donné l'écart de 23 points entre l'IMT et l'IRP, le QIT n'a pu être calculé.

1.3. Observation éducative – [REDACTED]

Théo est un jeune garçon conscient de ses difficultés notamment au foot où il peut évoquer qu'il « n'y arrive pas trop ». Ses parents, présents lors du rendez-vous, expliquent que les difficultés motrices ont un impact sur les activités que Théo peut effectuer, notamment pour réaliser les bons gestes et être concentré. Les parents peuvent aussi relater que les problèmes de Théo sont apparus dès la maternelle.

A la maison, Théo écoute de mieux en mieux ses parents, qui ont su imposer des règles de vie. Théo est ensuite reçu seul, et montre un certain intérêt pour les jeux de la salle. Lors d'un jeu, Théo peut parler de ses problèmes en écriture. C'est un enfant d'un bon contact, souriant mais ayant un manque d'assurance

1.4. Bilan orthophonique – [REDACTED]

Attention et mémoire : l'analyse visuelle est un peu faible et comporte des erreurs. Il présente une certaine lenteur. La mémoire de travail est de bonne qualité mais la mémoire immédiate est fragile en raison d'une saturation rapide de l'attention

A l'oral : déficit dans le versant expressif pour le vocabulaire et la syntaxe, fragilités dans la compréhension de consignes complexes

A l'écrit : lecture lente, accès au sens insuffisant. Voie d'adressage moins efficiente que la voie d'assemblage. Compréhension du texte lu déficitaire

1.5. Bilan psychomoteur

❖ Attention et fonctions exécutives

Nepsy : domaine attention / fonctions exécutives

Note aux domaines de base : 95 soit le Rang percentile 37

- Tour : NS 8/19
- Attention auditive : NS 11/19
- Attention visuelle : NS 9/19
- Fluidité de dessin : NS 6/19
- Statue : rang percentile 26-75

Théo s'est retrouvé en difficulté pour l'épreuve tour où il a montré une certaine impulsivité ce qui a entraîné de nombreuses erreurs. L'attention auditive et visuelle sont efficaces. Théo présente cependant peu de flexibilité mentale avec des persévérations mais une bonne persévérance motrice et inhibition.

❖ Compétences visuo-spatiales et visuo-constructives

Figure de Rey A

Copie : -3DS / temps : 4 min : Théo a procédé de proche en proche et de gauche à droite. On retrouve une figure scindée en deux parties dont on ne retrouve pas de forme globale.

Mémoire : + 0,6DS / temps : 1 min 20 : Pour la reproduction de mémoire, Théo a procédé de droite à gauche. On retrouve une figure qui n'est plus scindée en 2 et présentant une forme globale.

Nepsy : traitements visuo-spatiaux

Note aux domaines de base : 103 soit le Rang percentile 61

- Copie de figures : NS 8/19
- Flèches : NS 13/19
- Cubes : NS 14/19

Théo présente une bonne perception visuo-spatiale. Il observe bien les modèles qui lui sont présentés lors de l'épreuve des cubes.

❖ Echelle d'évaluation rapide de l'écriture chez l'enfant : BHK

Score total : - 3,4 DS ; Score vitesse : - 0,1 DS

Lors de cette épreuve, Théo est penché sur sa feuille. La prise du crayon est à 4 doigts. Au niveau de la qualité de l'écriture, on retrouve des lignes non planes, de nombreux levés de crayons, des formes de lettres ambiguës ainsi que des ratures. La vitesse d'écriture est quant à elle correcte, mais Théo peut nous dire « des fois j'écris lentement aussi » traduisant une certaine irrégularité de vitesse.

❖ Motricité

Batterie d'évaluation du mouvement chez l'enfant : M-ABC :

- Dextérité manuelle : ND 9 (< 5^{ème} centile) : théo présente une lenteur d'exécution et des difficultés dans les gestes fins. On peut aussi noter une certaine hypotonie des mains.
- Maitrise de balle : ND 3 (>15^{ème} centile): Théo maîtrise le lancer et l'attraper de balle mais présente des difficultés d'ajustement tonique altérant dans la visée.
- Equilibre statique et dynamique : ND 6 (entre le 5^{ème} et le 15^{ème} centile) : L'équilibre est fragile chez Théo et les difficultés sont majorées lorsque l'épreuve est dynamique et requière de la coordination (sauter et taper dans les mains). On peut aussi noter des syncinésies des bras.

⇒ Total : NTD 18 soit <5^{ème} centile

Nepsy : fonctions sensori-motrices

Note au domaine de base : 112 soit le Rang percentile 79

- Tapping : NS 14/19
- Imitation de positions de mains : NS 8/19
- Précision visuo-motrice : NS 13/19

Théo présente des syncinésies d'imitation et faciales ainsi qu'une hypertonie des doigts. Le tracé est peu fluide mais précis. L'épreuve de l'imitation des positions de mains révèle que Théo possède un référentiel égocentré. Il a pu s'aider de l'autre main pour les positions plus difficiles.

❖ Conclusions

Théo s'est montré très volontaire lors des passations, avec une envie de réussir et de bien faire. Il est resté très concentré tout au long des épreuves, même pour les plus difficiles. Théo paraît conscient de ses difficultés mais se montre persévérant pour réussir.

Dans sa posture, on retrouve une hypotonie générale (corps et mains) et un enroulement de l'axe. Il a pu se ronger les ongles souvent. On a aussi remarqué des syncinésies d'imitations et faciales.

Au final, Théo présente des capacités de visuo-construction performantes. L'attention auditive soutenue est efficace tout comme l'attention visuelle sélective et divisée. Théo manque néanmoins de stratégies de balayage visuel et de capacités de planification, qui restent cependant en progrès. Il peut aussi montrer une légère impulsivité. Par ailleurs, aux vues des résultats au BHK et au M-ABC, Théo présente un Trouble de l'Acquisition des Coordinations (TAC), type motricité fine, ainsi qu'une dysgraphie.

2. Evaluation des capacités d'imagerie motrice (pré-tests)

2.1. Visually Guided Pointing Task (VGPT)

Résultats

Indice de difficulté \ Temps de réalisation	Condition réelle	Condition imagerie
Niveau 1: 40 mm	25 sec	10 sec
Niveau 2: 20 mm	26 sec	17 sec
Niveau 3: 10 mm	16 sec	13 sec
Niveau 4: 5 mm	18 sec	11 sec
Niveau 5: 2,5 mm	15 sec	9 sec

Temps de réalisation de l'épreuve en fonction de la taille de la cible

Analyse des résultats

De manière générale, Théo s'est retrouvé en difficulté pour effectuer les mouvements de pointillage et notamment lorsque le niveau de difficulté, et donc la précision nécessaire, s'accroît. Le mouvement est saccadé. La réalisation d'un seul point à l'intérieur de la cible carré est difficile pour Théo qui en réalise plusieurs. La trace laissée sur la feuille ressemble davantage à des traits qu'à des points, dont la taille augmente à mesure que la difficulté augmente aussi.

En condition réelle : alors que la difficulté s'accroît, Théo devient plus rapide mais moins précis. La précision de réalisation des mouvements de pointillage et d'atteinte de la cible se voient ainsi diminuées.

En condition d'imagerie : le temps de réalisation est variable selon la cible. Cependant, on peut observer que Théo ne respecte pas le temps de réalisation du mouvement réel en imagerie : la durée du mouvement réel est systématiquement diminuée en condition d'imagerie.

2.2. *Hand Rotation Task*

Cette épreuve n'a été administrée qu'une seule fois, sans instruction. En effet, après celle-ci, Théo m'a expliqué qu'il avait imaginé ses mains tourner et a donc bien eu recours à l'imagerie motrice, c'est pourquoi je ne lui ai administré qu'une seule fois l'épreuve.

Résultats

Rotation	Main Droite		Main Gauche	
	Réponse	Temps (sec)	Réponse	Temps (sec)
0	X	3	X	1
Médiale	V	2	V	5
Latérale	V	1	X	7
180°	X	6	V	4

X = mauvaise réponse ; V = bonne réponse

Analyse des résultats

Théo s'est montré très rapide dans ses réponses mais aussi très fluctuant quant à l'exactitude. Il a fait des erreurs sur les positions les plus simples (sans rotation) mais a pu réussir pour des positions plus compliquées (rotation latérale ou à 180°)

La rotation médiale étant plus facile que la latérale, on devrait observer des réponses plus rapides et plus précises en rotation médiale. On retrouve bien ce phénomène dans les réponses de Théo pour la main gauche mais pas pour la main droite où il a été plus rapide pour la rotation latérale.

2.3. Conclusion

Les résultats à ces deux épreuves nous indiquent que Théo peut avoir recours à l'imagerie motrice même si celle-ci est peu efficace. De plus, on a pu observer que la loi de Fitts n'est pas respectée chez Théo tout comme le temps de mouvement réel en condition d'imagerie.

Il dispose cependant de pré-requis à l'imagerie motrice sur lesquels nous pourrions nous appuyer et que nous pourrions développer avec le protocole d'imagerie.

3. Mise en place du protocole et évolution

Afin de prendre en charge la dysgraphie de Théo, je me suis basée sur le protocole de F. Puyjarinet (2015), mis en place afin de comparer l'efficacité de l'imagerie motrice à une méthode validée, la CO-OP (Cognitive Orientation to daily Occupational Performance), pour la rééducation de la dysgraphie.

Timing prédictif

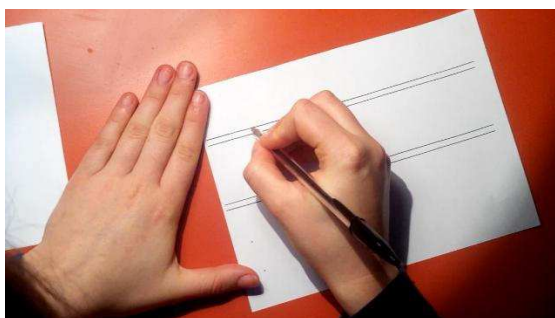
Cet exercice était difficile pour Théo qui tapait sur la sonnette souvent trop tôt. Il pouvait cependant s'ajuster grâce aux feedback. Par ailleurs, nous devons lui rappeler fréquemment de bien suivre des yeux le trajet de la balle car il avait tendance à effectuer un seul mouvement oculaire du départ à l'arrivée.

Pleine conscience

Théo a peu accédé à ce temps de relaxation et prise de conscience des ressentis corporels. Il lui était difficile de rester immobile sur la chaise et devait bouger ses parties du corps afin de les ressentir. Il lui a été difficile de verbaliser ses ressentis et pouvait seulement nous dire qu'il ne percevait aucune sensation dans son corps et peu de différence entre les parties du corps en contact avec la chaise et celles qui ne l'étaient pas. Par contre, ce temps avait un effet relaxant très important sur Théo qui se sentait, je le cite, « fatigué » et « détendu » par la suite.

Observation de vidéos

Les vidéos, préalablement filmées, montraient des productions de lettres, digrammes, trigrammes ou mots entiers. Elles étaient proposées avec une perspective interne. Les seules informations visuelles sur la vidéo comprenaient la main de la personne, le stylo et la feuille d'écriture utilisée en séance. Cette dernière était simplifiée et contenait 2 lignes noires espacées de 4 millimètres.



Nous avons tout d'abord travaillé des groupes de lettres isolées, qui avaient été regroupées selon les caractéristiques isomorphiques du mouvement nécessaire : a, c, d, q, o / e, l, h, k, f, b / i, t, u, v, w, j, y / m, n, p, r, s, x, z. Nous sommes ensuite passés à des digrammes. Nous avons utilisés les plus courants de la langue française : es, le, de, en, nt, re, on, ai, au, ou. Puis nous avons travaillé sur des trigrammes : ent, ant, ien, ait, ère, que, our. Enfin, nous sommes passés aux mots entiers, tirés de la liste des mots réguliers et irréguliers du test ODEDYS : sept, vigne.

Nous avons sélectionné les éléments en fonction des lettres et liaisons entre les lettres les plus dégradées dans le BHK de Théo.

Lors de l'observation des vidéos, l'attention de Théo était portée sur différentes caractéristiques :

- Les caractéristiques des lettres : sens conventionnel, taille etc..
- Les caractéristiques des enchainements des lettres : liaisons, espaces etc ...
- Les caractéristiques cinématiques : levées de crayon, fluidité, temps de mouvement, ralentissements, pics d'accélération etc ...

Imagerie

Pour ce temps d'imagerie, Théo devait s'imaginer écrire et notamment ressentir les sensations qui pouvaient être présentes dans la main. L'accent était ainsi mis sur les caractéristiques spatiales des lettres, les caractéristiques temporelles, et les sensations corporelles.

Théo était concentré pour le temps d'imagerie qu'il réalisait les yeux fermés. Il pouvait me dire qu'il « trouve ça plutôt facile ». Afin de m'assurer qu'il utilisait l'imagerie motrice et non l'imagerie visuelle, je lui demandais après chaque séance ce qu'il ressentait, ce qu'il voyait, ce qu'il imaginait. Il pouvait me dire qu'il s' « imagine écrire » et qu'il « voit les lettres s'écrire ». Nous ne pouvons cependant pas être sûrs qu'il utilisait à chaque fois l'imagerie motrice. J'insistais donc sur le fait qu'il devait s'imaginer lui-même écrire, en essayant de ressentir les sensations qu'il pouvait avoir au niveau de la main, des doigts, par exemple.

Pratique (annexes II, III, IV, V)

Pour chaque séance, seuls deux temps de pratique étaient proposés. Après la première production de Théo, nous lui demandions ce qu'il en pensait, ce qui était bien et ce qu'il pouvait améliorer. Nous le renforçons positivement afin qu'il prenne confiance, mais nous ne le guidions pas sur la technique de la production des lettres ou les points à améliorer. Théo était très juste sur son auto-évaluation et nous proposait des retours pertinents.

Les lettres isolées ont été facilement améliorées si on les compare au BHK. Nous avons notamment été étonnées d'une telle qualité de production dès la première séance. Les digrammes étaient eux aussi de qualité correcte avec néanmoins quelques lettres dansantes.

Cependant, les trigrammes restaient compliqués pour Théo, qui effectuait des levées de crayon après chaque lettre. Enfin, les mots entiers montrent une réalisation de bonne qualité avec peu de levées de crayon, des rapports entre les lettres correctes et une disposition par rapport aux lignes respectée. Théo a su intégrer au fil des séances les différentes caractéristiques observées lors des vidéos afin de les appliquer en pratique. Il semble que le caractère immuable du cadre fixé pour l'observation des vidéos ait aidé Théo, qui a su s'en saisir très vite.

Il a par ailleurs réussi à corriger pour chaque lettre « o » et « a » la position de départ. En effet, dans son BHK toutes ces lettres étaient produites en partant de la ligne inférieure et en réalisant un rond dans le sens anti-horaire, alors que ses productions après le temps d'imagerie montrent que ces lettres étaient réalisées avec le point de départ correct.

De plus, la réussite de certaines lettres, et notamment dès le début des séances, a permis à Théo d'être un peu plus confiant et d'avoir un meilleur rapport à l'écriture.

4. Post tests

4.1. VGPT

Résultats

Indice de difficulté \ Temps de réalisation	Condition réelle	Condition imagerie
Niveau 1: 40 mm	14 sec	14 sec
Niveau 2: 20 mm	13 sec	13 sec
Niveau 3: 10 mm	14 sec	13 sec
Niveau 4: 5 mm	14 sec	12 sec
Niveau 5: 2,5 mm	13 sec	16 sec

Analyse des résultats

En condition réelle : Théo peut diminuer sa vitesse de mouvement à l'approche de la cible et notamment lorsque celle-ci devient plus petite et requière un plus haut niveau de précision.

Cependant, le temps de réalisation reste constant malgré une difficulté croissante. La loi de Fitts n'est donc pas respectée en condition réelle.

En condition d'imagerie : le temps de réalisation est relativement similaire quel que soit le niveau de difficulté, traduisant une loi de Fitts non respectée. On note néanmoins une certaine isochronie temporelle entre le temps de réalisation réel et simulé.

4.2. *Hand rotation task*

Résultats

Rotation	Main Droite		Main Gauche	
	Réponse	Temps (sec)	Réponse	Temps (sec)
0	X	2	X	3
Médiale	V	5	X	3
Latérale	X	2	X	1
180°	X	5	V	5

X = mauvaise réponse ; V = bonne réponse

Analyse des résultats

Théo s'est montré rapide pour donner ses réponses mais a fait de nombreuses erreurs. On peut noter que ses deux bonnes réponses ont été marquées par un temps de réflexion légèrement plus long.

Théo a pu verbaliser qu'il a imaginé ses mains tourner afin de faire correspondre son pouce avec celui de l'image. On peut donc supposer que ses nombreuses erreurs viennent d'un manque de réflexion.

4.3. *BHK*

Score qualité : -3,1 DS (cotation classe CM2, garçon)

Score vitesse : -0,5 DS

Lors de cette épreuve, on a pu observer une prise du crayon à 4 doigts ainsi qu'une dysrythmie. Théo a montré une grande accélération de sa vitesse d'écriture à partir de la 3^{ème} ligne au détriment de la qualité de sa production. Le tracé de ses « a » et « o » a été réalisé en partant de la base de la lettre et en effectuant un rond dans le sens anti-horaire. On peut néanmoins noter moins de levers de crayons et un tonus de la main un peu plus élevé.

III- PROTOCOLE POUR LA PRISE EN CHARGE DES TROUBLES DE L'EQUILIBRE CHEZ UN PATIENT TAC

1. Présentation de Noah, [REDACTED]

1.1. *Eléments anamnestiques*

Motif de consultation : adressé au CMP en janv [REDACTED] par l'école pour des difficultés scolaires et un refus scolaire

Scolarité

Noah est en [REDACTED] effectué un redoublement de so [REDACTED]

Il présente des difficultés de graphisme et un isolement social. Il se sent seul et n'a presque pas de copains. Ses difficultés scolaires sont présentes depuis la maternelle.

Il est décrit par la maitresse comme vif, pertinent et sérieux

Suivi médical : Il est suivi pour un retard staturo-pondéral et a un traitement par hormones de croissance. Il bénéficie d'une rééducation orthophonique depuis le CP pour une dyslexie, et une dysorthographe et d'une prise en charge psychomotrice individuelle.

1.2. *Observation éducative – M*

Noah est un garçon de bon contact, assez réservé. Chez lui, il ne joue qu'aux jeux vidéo. Il aime cependant jouer avec sa sœur. Pendant le jeu qu'il a choisi, il est souriant et participe avec plaisir.

Pendant les vacances scolaires, Noah dit qu'il ne joue qu'à la Wii, X-box. Il évoque aussi qu'il apprend à faire du vélo et que sa sœur qui a 7 ans sait déjà faire du vélo « c'est comme si elle ne voulait pas que j'apprenne », exprime Noah.

Conclusion: Jeune de bon contact, à l'aise dans la relation, conscient de ses difficultés scolaires. Noah souhaite en reparler même à la fin de la séance où il évoque qu'il aimerait mieux écrire.

1.3. *Bilan psychométrique*

Entretien

Noah est un enfant calme, qui s'exprime aisément. Il évoque les difficultés qu'il peut rencontrer à l'école (concentration). Il relate des moqueries de la part de certains élèves et les plaintes somatiques sont récurrentes. Noah est préoccupé par son image corporelle et exprime son souhait d'être comme ses camarades.

Le niveau langagier est bon, les difficultés d'attention sont présentes et les réactions sont immatures. Il manque de confiance en lui et se montre fatigable.

Noah paraît plus investi sur les supports visuels, il cherche, prend le temps de la réflexion et montre une souplesse au niveau de la pensée. En revanche, il se montre peu persévérant sur les supports verbaux et se plaint de douleurs ou d'acouphènes.

WISC 4

ICV	IRP	IMT	IVT	QIT
99	81	100	81	86

Les résultats sont assez hétérogènes : l'ICV et l'IMT se situent dans la moyenne tandis que l'IRP et l'IVT se répartissent autour de la moyenne faible.

Les compétences sont représentées par un bon raisonnement catégoriel, un bon niveau lexical et une bonne compréhension des situations sociales et pratiques. Le raisonnement logique est satisfaisant et la mémoire de travail est efficace. Les difficultés repérées sont la

lenteur dans le traitement de l'information induite par des problèmes graphomoteurs et la faiblesse de la représentation spatiale

Conclusions : enfant qui investit bien les apprentissages mais qui présente des difficultés sur le plan grapho-moteur et un mal-être lié à ses problèmes de santé.

1.4. Bilan psychomoteur – [REDACTED] mois)

Présentation : Noah se présente comme un garçon inhibé avec peu d'initiative motrice lors du bilan. Le tonus est plutôt bas mais s'élève à l'action.

❖ Attention et fonctions exécutives

Nepsy : fonctions exécutives et attention

Note au domaine de base : 119 ; Soit le rang percentile 90

- Attention visuelle : NS 10/19
- Attention auditive : NS 12/19
- Tour : NS 15/19

A l'épreuve d'attention visuelle, Noah ne met pas en place de stratégie de balayage et a besoin sans cesse de se référer au modèle. Il est particulièrement performant dans l'épreuve de la tour et montre des capacités de planification et de flexibilité mentale.

❖ Perception spatiale et visuo-construction

Nepsy : traitements visuo-spatiaux

Note au domaine de base : 97 Soit le Rang Percentile (RP) 45

- Copie de figure : NS 8/19
- Flèches : NS 11/19
- Cubes : NS 10/19

L'aspect perceptif paraît préservé alors que la réalisation des figures est un peu faible. A l'épreuve des cubes Noah est pénalisé car il peine à manipuler les cubes avec précision

Figure de Rey A

Copie : -0,8DS : vitesse correspondant au RP 50-75

Mémoire : RP 25 : la figure est clivée en 2, la forme globale ne semble pas avoir été perçue.

❖ Echelle d'évaluation rapide de l'écriture chez l'enfant : BHK

Score total 23 soit -3,4DS

Vitesse : -1,3DS

L'écriture est chaotique avec des déformations de lettres ainsi que des liens souvent interrompus entre les lettres. La disposition spatiale est correcte et les rapports entre les lettres respectés. Noah présente une dysgraphie.

❖ Motricité

Batterie d'évaluation du Mouvement : M-ABC

- Dextérité manuelle : ND 10 (<5^{ème} centile) : la motricité fine est particulièrement déficitaire. Noah n'utilise pas une pince fine et effectue ses gestes avec lenteur.
 - Maitrise de balle : ND 6 (entre le 5^{ème} et le 15^{ème} centile) : les coordinations dynamiques générales sont fragiles
 - Equilibre statique et dynamique : ND 12,5 (<5^{ème} centile) : les épreuves engageant l'équilibre sont chutées. Noah semble en avoir conscience et s'énerve un peu.
 - *Equilibre sur une planche* : 5
 - *Sauter dans les carrés à cloche pied* : 3,5
 - *Balle en équilibre* : 4
- ⇒ Total : ND 28,5 soit <5^{ème} centile

Nepsy : fonctions sensori-motrices

Note au domaine de base : 89 soit le Rang Percentile 23

- Tapping : NS 10/19
- Précision visuo-motrice : 8/19
- Imitation de positions de mains : NS 8/19

Dans ces épreuves, on peut observer une certaine lenteur d'exécution ainsi que des difficultés idéo-praxiques. Noah peine à réaliser les gestes fins. Dans l'épreuve de précision visuo-motrice, il privilégie la précision à la vitesse (peur de mal faire et de dépasser)

❖ Conclusion

Noah est un jeune garçon qui d'emblée exprime ses difficultés relationnelles et son grand manque de confiance en lui. Il a conscience de ses difficultés et non de ses compétences.

L'analyse du bilan révèle un Trouble de l'Acquisition des Coordinations (TAC) mixte ainsi qu'une dysgraphie. En revanche, il possède des points forts en planification, résolution de problèmes ainsi qu'une bonne flexibilité mentale.

2. Evaluation des capacités d'imagerie motrice (pré-tests)

2.1. *VGPT*

Résultats

Indice de difficulté \ Temps de réalisation	Condition réelle	Condition imagerie
Niveau 1: 40 mm	72 sec	16 sec
Niveau 2: 20 mm	35 sec	9 sec
Niveau 3: 10 mm	26 sec	14 sec
Niveau 4: 5 mm	22 sec	16 sec
Niveau 5: 2,5 mm	22 sec	14 sec

Temps de réalisation de l'épreuve en fonction de la taille de la cible

Analyse des résultats

De manière générale, Noah a montré une grande anxiété quant à ses capacités de réussite. Cette anxiété s'est accentuée avec la consigne d'effectuer des mouvements de pointillage. Nous lui avons donc proposé un entraînement de ce mouvement sur une feuille blanche afin qu'il puisse réaliser l'épreuve. Noah présente des tics buccaux qui sont majorés avec cette épreuve.

En condition réelle : le premier trajet est réalisé avec une grande lenteur et peu de fluidité. Le mouvement de pointillage disparaît rapidement pour laisser place à la production de traits.

Noah montre un certain temps d'arrêt à l'approche de la cible pour pouvoir réaliser un point à l'intérieur de celle-ci. Cependant, la précision de celui-ci diminue fortement à partir de la troisième cible. Enfin, à mesure que la difficulté augmente, Noah se montre plus rapide.

En condition d'imagerie : le temps de réalisation en imagerie est plutôt constant. Il est néanmoins systématiquement largement inférieur qu'en condition réelle.

2.2. *Hand Rotation Task (HRT)*

Pour cette épreuve, j'ai proposé à Noah les deux conditions. En effet, après la première sans instruction, il a pu m'expliquer qu'il effectuait une rotation de l'image de la main afin de faire correspondre le pouce et l'ongle de celui-ci avec le sien. Il a donc eu recours à l'imagerie mentale et non à l'imagerie motrice. Je lui ai donc administré cette épreuve une seconde fois en lui demandant d'imaginer sa propre main tourner pour la faire correspondre avec l'image. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-après.

Résultats

	Sans instruction				Avec instruction			
	Main droite		Main gauche		Main droite		Main gauche	
Rotation	Réponse	Temps	Réponse	Temps	Réponse	Temps	Réponse	Temps
0°	V	1 sec	X	3 sec	V	1 sec	V	2 sec
Médiale	V	3 sec	V	4 sec	V	3 sec	V	4 sec
Latérale	V	5 sec	V	3 sec	V	3 sec	V	4 sec
180°	V	6 sec	V	6 sec	V	3 sec	V	5 sec

X = mauvaise réponse ; V = bonne réponse

Analyse des résultats

Lors de l'épreuve, et pour chaque image, Noah jetait un coup d'œil rapide à celles-ci avant de lever les yeux, réfléchir et donner la réponse. Il s'est montré performant sur cette épreuve et n'a fait qu'une erreur sur l'ensemble des deux conditions. Celle-ci avait d'ailleurs été directement corrigée car il s'en était rendu compte.

Au niveau du temps, Noah s'est montré plus rapide pour les positions de mains plus faciles et a fait preuve d'un petit temps de réflexion pour les plus difficiles. De plus, il a été en général plus rapide pour donner ses réponses en condition avec instruction.

2.3. Conclusion

Les résultats à ces deux épreuves nous indiquent que Noah peut avoir recours à l'imagerie motrice. Néanmoins, le temps de mouvement réel n'est pas respecté en condition d'imagerie, tout comme la loi de Fitts. Il dispose cependant de pré-requis à l'imagerie motrice sur lesquels nous pourrions nous appuyer et que nous pourrions développer avec le protocole d'imagerie.

3. Mise en place du protocole et évolution

Aux regards des difficultés de Noah et de sa demande, j'ai décidé de m'intéresser à ses troubles de l'équilibre dynamique. Je me suis basée sur le protocole de Wilson et al. (2002) qui se décompose de la même façon que celui pour la rééducation de l'écriture.

Timing prédictif

Noah s'est nettement amélioré sur cet exercice au fil des séances. Il tapait sur la sonnette souvent trop tôt mais se saisissait bien de mes feedback afin de s'ajuster. Sur la dernière séance, il a pu effectuer trois essais consécutifs corrects. Par ailleurs, lorsque nous faisons varier l'inclinaison de la pente, il pouvait prendre en compte le changement de vitesse de la balle et s'ajuster de manière adéquate au fil des séances.

Pleine conscience

La première séance fut compliquée pour Noah qui présentait des difficultés à garder les yeux fermés. Ses nombreux tics buccaux entravaient ce temps de relaxation et de prise de conscience des ressentis corporels. Noah peut me dire que c'est difficile pour lui de rester les yeux fermés.

Néanmoins, à mesure que nous avançons dans la prise en charge, nous avons pu observer une diminution des tics buccaux ainsi qu'un meilleur relâchement.

Au niveau des ressentis corporels, Noah peut nous dire qu'il perçoit de la chaleur dans son corps et qu'il s'agit d'une sensation agréable. Il a cependant peu de ressentis corporels excepté au niveau des points de contact avec la chaise.

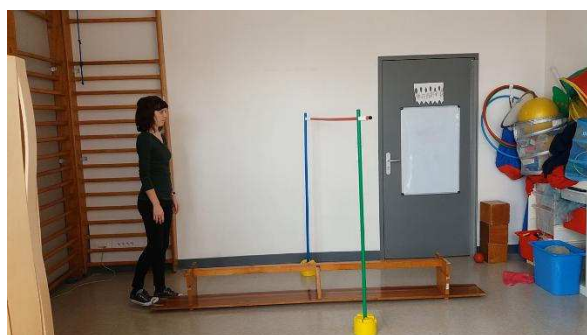
Il parvient aussi à se détendre de plus en plus et peut le verbaliser. Il se saisit bien de ce temps qui lui permet de se relâcher. En effet, le contexte socio-familial de ce jeune garçon étant compliqué, il est difficile pour lui d'avoir des moments de détente.

Observation de vidéos

Les vidéos réalisées portaient sur deux habiletés différentes : le saut et marcher sur une poutre. Pour chaque habileté, plusieurs vidéos ont été réalisées afin de proposer différentes situations :

- Pour la marche sur la poutre : marche simple, marcher avec une balle de 1 kilogramme dans une main, marcher en tenant un bâton des deux mains, marcher puis s'accroupir, ramasser des sac lestés posés sur la poutre, passer sous une barre etc.
- Pour le saut : sauts pieds joints dans 5 cerceaux, sauts pieds joints par-dessus un obstacle

Les vidéos devaient se rapprocher le plus possible des conditions réelles pour Noah. Dans l'idéal, il aurait fallu filmer un jeune garçon d'une dizaine d'années, avec une perspective externe afin de montrer l'habileté ciblée d'un point de vue technique, puis avec une perspective interne. N'ayant pas trouvé de jeune garçon de cet âge, et n'ayant qu'un simple portable pour filmer, je n'ai ainsi pu réaliser des vidéos que d'une fille d'une vingtaine d'années, avec une perspective externe.



Lors de l'observation des vidéos, l'attention de Noah était portée tout d'abord sur la technique afin qu'il ait une vision globale de l'habileté (port de bras, port de tête, préparation à l'impulsion, réception etc ...) puis sur les sensations kinesthésiques et proprioceptives (ce qu'il se passe au niveau des articulations, lors d'un déséquilibre, le recrutement tonique etc...) et le temps de réalisation.

Imagerie

Lors de ce temps d'imagerie, Noah devait s'imaginer marcher sur la poutre ou sauter en prenant en compte toutes les sensations kinesthésiques et proprioceptives associées à ces activités motrices. L'accent était aussi mis sur la préparation de l'action, et sur les caractéristiques temporelles de celle-ci.

Pour cet exercice, Noah montrait une certaine rapidité, et ne respectait pas les temps de mouvement réel. Il a aussi été nécessaire que je lui donne un top de départ avant chaque temps d'imagerie. Il a ainsi pu, au fil des séances, ajuster sa vitesse mentale pour la réalisation des habiletés en imagerie.

Afin de m'assurer que Noah utilisait bien l'imagerie motrice, je lui demandais ce qu'il voyait, ce qu'il imaginait et ressentait. Il pouvait alors me dire qu'il s'imaginait traverser la poutre, qu'il sentait ses jambes se plier pour s'accroupir, et qu'il ressentait la force dans ses jambes pour sauter.

Pratique réelle

Marches sur poutre : Dès la première mise en pratique, Noah nous montre qu'il a bien pris en compte les caractéristiques observées sur les vidéos. Il se prépare bien pour marcher sur la poutre, avec un port de bras et de tête adéquats. Il fait preuve de bons ajustements posturaux lors des déséquilibres. Il peut verbaliser les techniques qu'il utilise afin de ne pas tomber : « je mets mon poids du corps de l'autre côté ». On peut cependant observer de nombreux mouvements du tronc et des bras révélant une certaine instabilité.

Lorsque nous sommes passés à l'étape de se mettre accroupi, cela a été difficile. Il a cependant réussi dans un deuxième temps à trouver des stratégies pour maintenir son équilibre, stratégies qu'il testait grâce au deuxième temps d'imagerie proposé lors des séances.

De même, pour ramasser les sacs lestés, Noah ne s'ajustait pas au niveau de la distance avec le sac lesté. Il se retrouvait alors trop loin de celui-ci pour le ramasser, avec le mauvais pied de soutien, et se mettait en condition de déséquilibre. Nous avons donc décidé de dédier une seconde séance aux vidéos « s'accroupir » et « ramasser les sacs lestés ». Il semble que Noah a pu tirer bénéfice de celle-ci, nous montrant une meilleure anticipation pour son ajustement à la distance et pour sa stabilisation avant de s'accroupir ou de ramasser un sac.

Les mouvements des bras et du tronc ont pu diminuer, témoignant d'un meilleur contrôle postural. Au fil des séances, il présentait une meilleure organisation et une diminution du recrutement tonique pour la réalisation des habiletés.

Sauts : D'un point de vue technique, Noah utilise bien ses bras pour se préparer au saut mais ne marque pas de réelle phase d'impulsion en pliant les jambes. Il les fléchit légèrement à l'impulsion et les garde relativement tendues pour l'enchaînement des sauts. On ne note cependant pas de difficulté particulière pour les enchaîner.

Nous lui avons donc proposé par la suite d'enchaîner 5 sauts par-dessus des obstacles. Cette situation fût légèrement difficile dans un premier temps car Noah dépensait une grande énergie pour passer les obstacles. Il se retrouvait alors fatigué pour les derniers sauts. Il pouvait lui-même verbaliser qu'il sentait ses jambes pousser très fort pour pouvoir sauter.

Par ailleurs, il pouvait décoller du sol les pieds joints mais la phase d'envol était marquée par un décalage de ceux-ci et donc une réception un pied avant l'autre. Je lui ai donc fait porter son attention dans le second temps d'imagerie sur les aspects auditifs du saut et notamment lors de la réception. Il semble que cela l'ai aidé car il a pu nous proposer quelques sauts avec une bonne réception.

4. Post tests

4.1. *VGPT*

Résultats

Indice de difficulté \ Temps de réalisation	Condition réelle	Condition imagerie
Niveau 1: 40 mm	16 sec	14 sec
Niveau 2: 20 mm	14 sec	14 sec
Niveau 3: 10 mm	15 sec	13 sec
Niveau 4: 5 mm	16 sec	13 sec
Niveau 5: 2,5 mm	15 sec	17 sec

Analyse des résultats

D'emblée j'ai proposé à Noah une feuille afin qu'il s'entraîne au mouvement de pointillage, lequel l'avait rendu anxieux lors du premier test.

En condition réelle : le mouvement de pointillage manque toujours de fluidité et le tracé laisse place au fil de l'épreuve à des traits. Noah montre des syncinésies buccales importantes lors de cette épreuve qui lui est coûteuse. Le temps de réalisation est constant malgré l'augmentation de la difficulté, révélant une loi de Fitts non respectée. Noah ralentit bien sa vitesse à l'approche de la cible mais la précision de l'atteinte de celle-ci tend à diminuer à partir de la 4^{ème} cible.

En condition d'imagerie : le temps de réalisation en imagerie est constant, ce qui signifie que Noah ne respecte pas la loi de Fitts en imagerie. Néanmoins, on peut noter une invariance temporelle entre la condition réelle et simulée

4.2. *Hand rotation task*

Résultats

Rotation	Main Droite		Main Gauche	
	Réponse	Temps (sec)	Réponse	Temps (sec)
0	V	1	V	2
Médiale	V	2	V	3
Latérale	V	3	V	2
180°	V	2	V	4

X = mauvaise réponse ; V = bonne réponse

Analyse des résultats

Tout comme la première passation, Noah s'est montré performant lors de cette épreuve et n'a fait aucune erreur. Il était très concentré et a pu m'expliquer sa stratégie : le fait que ses mains étaient en position palmaire, il s'est imaginé retourner sa main selon les deux axes de rotation afin de faire correspondre son majeur avec celui de l'image. Je peux donc déduire qu'il a bien eu recours à l'imagerie motrice et que celle-ci a été efficace.

Au niveau du temps, il s'est montré légèrement plus rapide pour les positions de mains plus faciles et a pu prendre son temps pour les plus difficiles, notamment la rotation à 180°.

4.3. *M-ABC*

Résultats

Equilibre statique et dynamique : ND 5 soit le 15^{ème} centile

- *Equilibre sur les planches* : 0
- *Sauter et taper des mains* : 2
- *Marche à reculons* : 3

Analyse des résultats :

De manière générale, on peut noter de nombreux mouvements du tronc et des bras lors des épreuves *équilibre sur les planches* et *marche à reculons*. On remarque aussi que l'équilibre dynamique est plus difficile que l'équilibre statique pour Noah. Il obtient un score dans la norme pour l'*équilibre sur les planches*.

DISCUSSION

Les observations réalisées lors des différentes séances, tant pour les productions écrites de Théo que motrices de Noah, nous montrent une nette progression qualitative pour ces deux jeunes patients. Ils ont su accéder à cette technique, se l'approprier et la mettre en pratique. L'alternance des temps d'imagerie et de pratique à chaque séance leur ont notamment permis de s'ajuster afin de trouver des stratégies de rééquilibration pour Noah ou de production des lettres pour Théo.

Théo

A la lecture des résultats de Théo, et en les comparant aux pré-tests, on ne note pas de différence significative en ce qui concerne l'épreuve de rotation de mains (HRT). En effet, il ne s'est pas montré plus performant dans ses capacités d'imagerie. En revanche, pour l'épreuve du VGPT on observe une nette évolution : il présente maintenant une isochronie temporelle entre le temps de réalisation réel et simulé. Nous pouvons attribuer ceci aux entraînements de timing prédictif réalisés à chaque début de séance. Ceux-ci lui ont permis d'ajuster sa vitesse mentale aux trajectoires de la balle mais aussi de transférer cette capacité sur une autre activité comme le VGPT.

En ce concerne les scores au BHK, on ne relève que peu de différence entre les notes de dégradation totales aux test et re-test. Cependant, nous pouvons remarquer l'amélioration de quatre critères : lignes non planes, liens interrompus entre les lettres, distorsion des lettres, formes de lettres ambiguës. Il est possible qu'il s'agisse ici de l'effet du protocole. En effet, nous faisons porter l'attention de Théo, lors de l'observation des vidéos et lors du temps d'imagerie, sur l'enchaînement des lettres, les levers de crayon, la forme spatiale de la lettre, caractéristiques impliquées dans ces critères.

CRITERES	TEST		RE TEST	
	Score (ND)	DS	Score (ND)	DS
1. écriture grande	1	-3	1	-3
2. inclinaison de la marge à droite	0	+0,14	1	-3,5
3. lignes non planes	5	-2,5	4	-1,61

4. mots serrés	2	+ 0,1	2	+0,1
5. écriture chaotique	1	+ 1,5	2	-3,37
6. liens interrompus entre les lettres	4	-0,7	1	+1,14
7. télescopages	2	-2,3	2	-2,3
8. variation dans la grandeur des lettres troncs	2	+ 0,7	3	+0,1
9. hauteur relative incorrecte	1		2	
10. distorsion des lettres	1	-4	0	+0,2
11. formes de lettres ambiguës	4	-4,7	3	-3,4
12. lettres retouchées	1	-0,6	1	-0,6
13. hésitations et tremblements	0	+0,17	0	+0,17
TOTAL	24	-3,4	22	-2,8

Malgré cette faible d'évolution, nous pouvons tout de même affirmer que Théo a su se saisir de cette technique à chaque séance. En effet, la qualité de ses productions, et ceci dès la première séance, nous a indéniablement interpellées. Il a pu, séance après séance, mettre en pratique les observations réalisées sur les vidéos après les avoir intégrées en imagerie. On peut penser que le faible nombre de séances réalisées n'a pas permis d'atteindre aujourd'hui une amélioration quantitative de l'écriture mais le travail de rééducation de l'écriture via l'imagerie motrice doit se poursuivre.

Noah

A la lecture des résultats de Noah aux post-tests et en les comparant aux pré-tests, nous pouvons remarquer une amélioration significative. En effet, il s'est révélé plus rapide pour l'épreuve du VGPT et a montré un temps de réalisation en imagerie presque identique au temps de réalisation réel. Nous pouvons attribuer cela à l'entraînement au timing prédictif réalisé à chaque séance. Nous avons notamment remarqué chez Noah, au fil de ces entraînements, une meilleure estimation temporelle de la trajectoire de la balle. Ce temps d'exercice au timing prédictif paraît donc efficace chez Noah pour l'amélioration de l'estimation temporelle d'un mouvement.

Par ailleurs, on peut noter qu'il possède des capacités d'imagerie motrice efficaces qui lui ont permis de se saisir du protocole proposé. En effet, d'un point de vue quantitatif, si nous regardons les résultats au M-ABC on remarque une diminution de 7,5 points de la note de dégradation au subtest *équilibre statique et dynamique*, celle-ci passant de 12,5 à 5. Il se situe alors au niveau du 15^{ème} centile pour ce domaine.

De plus, l'observation clinique nous a permis de noter de meilleurs ajustements posturaux, un contrôle postural plus efficace et un recrutement tonique plus adapté. Ces observations qualitatives sont attribuables aux temps d'imagerie proposés lors des séances. En effet, l'imagerie motrice correspond à la capacité de générer des représentations internes des mouvements et actions, lesquelles participent au contrôle moteur et à la prédiction des mouvements.

Ce protocole paraît ainsi adapté à Noah et ce d'autant plus qu'il présentait de bonnes capacités d'imagerie motrice avant de le commencer. Il lui a permis de normaliser ses capacités d'équilibre statique et dynamique.

CONCLUSION

Au final, dans le cadre de ce mémoire, l'imagerie motrice apparaît comme une technique innovante et efficace pour la rééducation des troubles de l'équilibre et de la dysgraphie. Cette efficacité reste soumise à différentes conditions. En effet, le niveau cognitif paraît dépendant des capacités d'élaboration et de représentation mentale permettant, peut-être, d'avoir accès plus facilement à cette technique. Nous pouvons aussi noter que la compliance de l'enfant au cadre du protocole a participé activement aux bénéfices de l'imagerie motrice. En effet, il est nécessaire que les patients prennent part de manière volontaire aux séances. Par ailleurs, il paraît évident que le nombre de séances est corrélé à l'intégration de la technique et à son efficacité. On peut alors se demander dans quelle mesure la généralisation est-elle possible ? Enfin, il semble que l'intrication des différents processus impliqués dans ce protocole (capacités d'imitation, activation des neurones miroirs, imagerie motrice, mise en pratique) permet l'accès à la représentation interne du mouvement.

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.
- Adams, I. L., Steenbergen, B., Lust, J. M., & Smits-Engelsman, B. C. (2016). Motor imagery training for children with developmental coordination disorder—study protocol for a randomized controlled trial. *BMC neurology*, *16*(1), 1.
- Brown, R. M., & Palmer, C. (2013). Auditory and motor imagery modulate learning in music performance. *Front. Hum. Neurosci*, *7*(320), 10-3389.
- Butson, M. L., Hyde, C., Steenbergen, B., & Williams, J. (2014). Assessing motor imagery using the hand rotation task: Does performance change across childhood?. *Human movement science*, *35*, 50-65.
- Caeyenberghs, K., Tsoupas, J., Wilson, P. H., & Smits-Engelsman, B. C. (2009). Motor imagery development in primary school children. *Developmental Neuropsychology*, *34*(1), 103-121.
- Choudhury, S., Charman, T., Bird, V., & Blakemore, S. J. (2007a). Adolescent development of motor imagery in a visually guided pointing task. *Consciousness and cognition*, *16*(4), 886-896
- Choudhury, S., Charman, T., Bird, V., & Blakemore, S. J. (2007b). Development of action representation during adolescence. *Neuropsychologia*, *45*(2), 255-262.
- Davidson, P. R., & Wolpert, D. M. (2005). Widespread access to predictive models in the motor system: a short review. *Journal of Neural Engineering*, *2*(3), S313.
- Decety, J., Jeannerod, M., Germain, M., & Pastene, J. (1991). Vegetative response during imagined movement is proportional to mental effort. *Behavioural brain research*, *42*(1), 1-5.
- Decety, J. (1996). The neurophysiological basis of motor imagery. *Behavioural brain research*, *77*(1), 45-52.
- Decety, J., Grezes, J., Costes, N., Perani, D., Jeannerod, M., Procyk, E., ... & Fazio, F. (1997). Brain activity during observation of actions. Influence of action content and subject's strategy. *Brain*, *120*(10), 1763-1777.

Fautrelle Lilian. (2012, Avril). *Flexibilité du contrôle moteur dans les mouvements complexes dirigés*. Thèse, Université de Bourgogne

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.

Flanagan, J. R., & Wing, A. M. (1997). The role of internal models in motion planning and control: evidence from grip force adjustments during movements of hand-held loads. *The Journal of Neuroscience, 17*(4), 1519-1528.

Flanagan, J. R., Vetter, P., Johansson, R. S., & Wolpert, D. M. (2003). Prediction precedes control in motor learning. *Current Biology, 13*(2), 146-150.

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.

Grangeon, M., Guillot, A., & Collet, C. (2009). Effets de l'imagerie motrice dans la rééducation de lésions du système nerveux central et des atteintes musculo-articulaires. *Movement & Sport Sciences, (2)*, 9-38.

Guilbert, J., Jouen, F., Lehalle, H., & Molina, M. (2013). Imagerie motrice interne et simulation de l'action chez l'enfant. *L'Année psychologique, 113*(03), 459-488.

Holmes, P. S., & Collins, D. J. (2001). The PETTLEP approach to motor imagery: A functional equivalence model for sport psychologists. *Journal of Applied Sport Psychology, 13*(1), 60-83.

Jeannerod, M. (1994). The representing brain: Neural correlates of motor intention and imagery. *Behavioral and Brain sciences, 17*(02), 187-202.

Jeannerod, M. (1995a). Mental imagery in the motor context. *Neuropsychologia, 33*(11), 1419-1432.

Jeannerod, M., & Decety, J. (1995b). Mental motor imagery: a window into the representational stages of action. *Current opinion in neurobiology, 5*(6), 727-732.

Jeannerod, M. (2001). Neural simulation of action: a unifying mechanism for motor cognition. *Neuroimage, 14*(1), S103-S109.

- Kawato, M. (1999). Internal models for motor control and trajectory planning. *Current opinion in neurobiology*, 9(6), 718-727.
- Lebon, F., Rouffet, D., Guillot, A., & Collet, C. (2008). Imagerie motrice et activité électromyographique. *Movement & Sport Sciences*, (2), 11-34.
- Lebon, F., Gueugneau, N., & Papaxanthis, C. (2013). Modèles internes et imagerie motrice. *Movement & Sport Sciences*, (4), 51-61.
- Loison, B., Moussaddaq, A. S., Cormier, J., Richard, I., Ferrapie, A. L., Ramond, A., & Dinomais, M. (2013). Translation and validation of the French Movement Imagery Questionnaire–Revised Second version (MIQ-RS). *Annals of physical and rehabilitation medicine*, 56(3), 157-173.
- Lotze, M., Montoya, P., Erb, M., Hülsmann, E., Flor, H., Klose, U., ... & Grodd, W. (1999). Activation of cortical and cerebellar motor areas during executed and imagined hand movements: an fMRI study. *Journal of cognitive neuroscience*, 11(5), 491-501.
- Lotze, M., & Halsband, U. (2006). Motor imagery. *Journal of Physiology-paris*, 99(4), 386-395.
- Lotze, M. (2013). Kinesthetic imagery of musical performance. *Front. Hum. Neurosci*, 7(280), 10-3389.
- Molina, M., Tijus, C., & Jouen, F. (2008). The emergence of motor imagery in children. *Journal of experimental child psychology*, 99(3), 196-209.
- Moseley, G. L. (2007). Using visual illusion to reduce at-level neuropathic pain in paraplegia. *Pain*, 130(3), 294-298.
- Munzert, J., Lorey, B., & Zentgraf, K. (2009). Cognitive motor processes: the role of motor imagery in the study of motor representations. *Brain research reviews*, 60(2), 306-326.
- Noten, M., Wilson, P., Ruddock, S., & Steenbergen, B. (2014). Mild impairments of motor imagery skills in children with DCD. *Research in developmental disabilities*, 35(5), 1152-1159.
- Puyjarinet, F. (2015). Intérêt de l'imagerie motrice dans la rééducation de la dysgraphie chez l'enfant. In J.-M. Albaret, E. Martin & R. Soppelsa (Eds.), *Les entretiens de Psychomotricité 2015* (pp. 80-96). Toulouse : Europa Digital & Publishing

- Puyjarinet, F. (2016). Principes et intérêts de la pratique de l'imagerie motrice en rééducation psychomotrice. *A paraître prochainement dans Evolutions Psychomotrices*
- Reynolds, J. E., Licari, M. K., Elliott, C., Lay, B. S., & Williams, J. (2015). Motor imagery ability and internal representation of movement in children with probable developmental coordination disorder. *Human movement science, 44*, 287-298.
- Roth, M., Decety, J., Raybaudi, M., Massarelli, R., Delon-Martin, C., Segebarth, C., ... & Jeannerod, M. (1996). Possible involvement of primary motor cortex in mentally simulated movement: a functional magnetic resonance imaging study. *Neuroreport, 7*(7), 1280-1284.
- Schuster, C., Hilfiker, R., Amft, O., Scheidhauer, A., Andrews, B., Butler, J., et al. (2011). Best practice for motor imagery: a systematic literature review on motor imagery training elements in five different disciplines. *BMC medicine, 9*, 1, 75
- Shadmehr, R., & Mussa-Ivaldi, F. A. (1994). Adaptive representation of dynamics during learning of a motor task. *The Journal of Neuroscience, 14*(5), 3208-3224.
- Shepard, R.N. & Metzler, J. (1971). Mental Rotation of Three-Dimensional Objects. *Science, 171*, 701-703
- Sordoni, C., Hall, C., & Forwell, L. (2002). The use of imagery in athletic injury rehabilitation and its relationship to self-efficacy. *Physiotherapy Canada, 54*(3), 177-185.
- Ter Horst, A. C., van Lier, R., & Steenbergen, B. (2010). Mental rotation task of hands: differential influence number of rotational axes. *Experimental Brain Research, 203*(2), 347-354.
- Tumas, V., & Sakamoto, A. C. (2009). A kinesthetic motor imagery study in patients with writer's cramp. *Arquivos de neuro-psiquiatria, 67*(2B), 396-401.
- Van Gyn, G. H., Wenger, H. A., & Gaul, C. A. (1990). Imagery as a Method of Enhancing Transfer From Training to Performance. *Journal of Sport & Exercise Psychology, 12*(4).
- 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., Maruff, P., Ives, S., & Currie, J. (2001). Abnormalities of motor and praxis imagery in children with DCD. *Human Movement Science, 20*(1), 135-159.

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.

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.

Wolpert, D. M., & Kawato, M. (1998). Multiple paired forward and inverse models for motor control. *Neural networks*, *11*(7), 1317-1329.

Wolpert, D. M., & Ghahramani, Z. (2000). Computational principles of movement neuroscience. *nature neuroscience*, *3*, 1212-1217.

ANNEXES

Annexe I : Movement Imagery Questionnaire – Revised Second version (MIQ-RS)

Échelle d'imagerie visuelle

Très difficile à visualiser	Difficile à visualiser	Assez difficile à visualiser	Neutre (ni facile ni difficile)	Assez facile à visualiser	Facile à visualiser	Très facile à visualiser

Échelle d'imagerie kinesthésique

Très difficile à sentir	Difficile à sentir	Assez difficile à sentir	Neutre (ni facile ni difficile)	Assez facile à sentir	Facile à sentir	Très facile à sentir

1. Position de départ : Debout, pieds joints, bras le long du corps.

Action : Montez votre genou aussi haut que possible afin de vous tenir sur une jambe. Le genou de la jambe levée doit être maintenu fléchi. Maintenant abaissez votre jambe jusqu'à ce que vous vous retrouviez en position pieds joints. Exécutez ces actions lentement.

Tâche Mentale : Prenez la position de départ. Essayez de vous sentir en train de faire le mouvement que vous venez d'exécuter sans le faire réellement. Maintenant, estimez la facilité ou la difficulté avec laquelle vous étiez capable de faire cette tâche mentale.

Très difficile à sentir	Difficile à sentir	Assez difficile à sentir	Neutre (ni facile ni difficile)	Assez facile à sentir	Facile à sentir	Très facile à sentir

2. Position de départ : Assis, mettez votre poing fermé sur votre genou.

Action : Déplacer votre bras au-dessus de votre tête. Gardez votre bras tendu pendant le mouvement et le poing fermé. Ensuite baisser votre bras jusqu'à votre genou en maintenant le bras tendu et le poing fermé.

Tâche Mentale : Prenez la position de départ. Essayez de vous voir en train de faire le mouvement que vous venez d'exécuter avec une image aussi claire et vive que possible. Maintenant, estimez la facilité ou la difficulté avec laquelle vous étiez capable de faire cette tâche mentale.

Très difficile à visualiser	Difficile à visualiser	Assez difficile à visualiser	Neutre (ni facile ni difficile)	Assez facile à visualiser	Facile à visualiser	Très facile à visualiser

3. Position de départ : Élevez latéralement (sur le côté) votre bras afin qu'il soit parallèle au sol, la paume vers le bas. Gardez celui-ci tendu, main ouverte.

Action : Déplacez votre bras parallèlement au sol jusqu'à ce qu'il soit directement devant vous. Gardez votre bras tendu pendant le mouvement et faites le mouvement lentement.

Tâche Mentale : Prenez la position de départ. Essayez de vous sentir en train de faire le mouvement que vous venez d'exécuter sans le faire réellement. Maintenant, estimez la facilité ou la difficulté avec laquelle vous étiez capable de faire cette tâche mentale.

--	--	--	--	--	--	--

Très difficile à sentir	Difficile à sentir	Assez difficile à sentir	Neutre (ni facile ni difficile)	Assez facile à sentir	Facile à sentir	Très facile à sentir
-------------------------	--------------------	--------------------------	---------------------------------	-----------------------	-----------------	----------------------

4. Position de départ : Debout, pieds légèrement écartés, et vos bras complètement étendus au-dessus de votre tête.

Action : Lentement, fléchissez le haut du corps vers l'avant au niveau de la taille et essayez de toucher vos orteils avec le bout de vos doigts (ou si possible, touchez le sol avec le bout de vos doigts ou vos mains). Maintenant revenez à la position de départ en vous redressant avec les bras tendus au-dessus de votre tête.

Tâche Mentale : Prenez la position de départ. Essayez de vous voir en train de faire le mouvement que vous venez d'exécuter avec une image aussi claire et vive que possible. Maintenant, estimez la facilité ou la difficulté avec laquelle vous étiez capable de faire cette tâche mentale.

--	--	--	--	--	--	--

Très difficile à visualiser	Difficile à visualiser	Assez difficile à visualiser	Neutre (ni facile ni difficile)	Assez facile à visualiser	Facile à visualiser	Très facile à visualiser
-----------------------------	------------------------	------------------------------	---------------------------------	---------------------------	---------------------	--------------------------

5. Position de départ : Mettez votre main devant vous à hauteur d'épaule comme si vous alliez pousser pour ouvrir une porte battante. Paume dirigée vers l'avant et vos doigts doivent être dirigés vers le haut.

Action : Étendez votre bras complètement comme si vous alliez pousser pour ouvrir la porte. Gardez vos doigts pointés vers le haut. Maintenant laissez la porte battante se refermer en ramenant votre bras et votre main vers vous en position de départ.

Tâche Mentale : Prenez la position de départ. Essayez de vous voir en train de faire le mouvement que vous venez d'exécuter avec une image aussi claire et vive que possible. Maintenant, estimez la facilité ou la difficulté avec laquelle vous étiez capable de faire cette tâche mentale.

--	--	--	--	--	--	--

Très difficile à visualiser	Difficile à visualiser	Assez difficile à visualiser	Neutre (ni facile ni difficile)	Assez facile à visualiser	Facile à visualiser	Très facile à visualiser
-----------------------------	------------------------	------------------------------	---------------------------------	---------------------------	---------------------	--------------------------

6. Position de départ : Assis, mettez votre main sur votre genou. Feignez que vous voyez un verre d'eau sur une table juste devant vous.

Action : Inclinez vous vers l'avant, saisissez le verre et soulevez-le légèrement au-dessus de la table. Maintenant reposez- le sur la table et remettez votre main sur le genou.

Tâche Mentale : Prenez la position de départ. Essayez de vous sentir en train de faire le mouvement que vous venez d'exécuter sans le faire réellement. Maintenant, estimez la facilité ou la difficulté avec laquelle vous étiez capable de faire cette tâche mentale.

--	--	--	--	--	--	--

Très difficile à sentir	Difficile à sentir	Assez difficile à sentir	Neutre (ni facile ni difficile)	Assez facile à sentir	Facile à sentir	Très facile à sentir
-------------------------	--------------------	--------------------------	---------------------------------	-----------------------	-----------------	----------------------

7. Position de départ : Votre main est le long du corps. Feignez qu'il y a devant vous une porte fermée.

Action : Inclinez vous vers l'avant et tendez le bras en avant, saisissez la poignée. Tirez celle-ci pour ouvrir la porte. Fermez maintenant doucement la porte, lâchez la poignée et ramenez votre main le long du corps.

Tâche Mentale : Prenez la position de départ. Essayez de vous sentir en train de faire le mouvement que vous venez d'exécuter sans le faire réellement. Maintenant, estimez la facilité ou la difficulté avec laquelle vous étiez capable de faire cette tâche mentale.

--	--	--	--	--	--	--

Très difficile à sentir	Difficile à sentir	Assez difficile à sentir	Neutre (ni facile ni difficile)	Assez facile à sentir	Facile à sentir	Très facile à sentir
-------------------------	--------------------	--------------------------	---------------------------------	-----------------------	-----------------	----------------------

8. Position de départ : Debout, pieds joints, bras le long du corps.

Action : Montez votre genou aussi haut que possible afin de vous tenir sur une jambe. Le genou de la jambe levée doit être maintenue fléchi. Maintenant abaissez votre jambe jusqu'à ce que vous vous retrouviez en position pieds joints. Exécutez ces actions lentement.

Tâche Mentale : Prenez la position de départ. Essayez de vous voir en train de faire le mouvement que vous venez d'exécuter avec une image aussi claire et vive que possible. Maintenant, estimez la facilité ou la difficulté avec laquelle vous étiez capable de faire cette tâche mentale.

Très difficile à visualiser	Difficile à visualiser	Assez difficile à visualiser	Neutre (ni facile ni difficile)	Assez facile à visualiser	Facile à visualiser	Très facile à visualiser

9. Position de départ : Assis, mettez votre poing fermé sur votre genou.

Action : Déplacer votre bras au-dessus de votre tête. Gardez votre bras tendu pendant le mouvement et le poing fermé. Ensuite baisser votre bras jusqu'à votre genou en maintenant le bras tendu et le point fermé.

Tâche Mentale : Prenez la position de départ. Essayez de vous sentir en train de faire le mouvement que vous venez d'exécuter sans le faire réellement. Maintenant, estimez la facilité ou la difficulté avec laquelle vous étiez capable de faire cette tâche mentale.

Très difficile à sentir	Difficile à sentir	Assez difficile à sentir	Neutre (ni facile ni difficile)	Assez facile à sentir	Facile à sentir	Très facile à sentir

10. Position de départ : Elevez latéralement (sur le côté) votre bras afin qu'il soit parallèle au sol, la paume vers le bas. Gardez celui-ci tendu, main ouverte.

Action : Déplacez votre bras parallèlement au sol jusqu'à ce qu'il soit directement devant vous. Gardez votre bras tendu pendant le mouvement et faites le mouvement lentement.

Tâche Mentale : Prenez la position de départ. Essayez de vous voir en train de faire le mouvement que vous venez d'exécuter avec une image aussi claire et vive que possible. Maintenant, estimez la facilité ou la difficulté avec laquelle vous étiez capable de faire cette tâche mentale.

Très difficile à visualiser	Difficile à visualiser	Assez difficile à visualiser	Neutre (ni facile ni difficile)	Assez facile à visualiser	Facile à visualiser	Très facile à visualiser

11. Position de départ : Debout, pieds légèrement écartés, et vos bras complètement étendus au-dessus de votre tête.

Action : Lentement, fléchissez le haut du corps vers l'avant au niveau de la taille et essayez de toucher vos orteils avec le bout de vos doigts (ou si possible, touchez le sol avec le bout de vos doigts ou vos mains). Maintenant revenez à la position de départ en vous redressant avec les bras tendus au-dessus de votre tête.

Tâche Mentale : Prenez la position de départ. Essayez de vous sentir en train de faire le mouvement que vous venez d'exécuter sans le faire réellement. Maintenant, estimez la facilité ou la difficulté avec laquelle vous étiez capable de faire cette tâche mentale.

Très difficile à sentir	Difficile à sentir	Assez difficile à sentir	Neutre (ni facile ni difficile)	Assez facile à sentir	Facile à sentir	Très facile à sentir

12. Position de départ : Mettez votre main devant vous à hauteur d'épaule comme si vous alliez pousser pour ouvrir une porte battante. Paume dirigée vers l'avant et vos doigts doivent être dirigés vers le haut.

Action : Étendez votre bras complètement comme si vous alliez pousser pour ouvrir la porte. Gardez vos doigts pointés vers le haut. Maintenant laissez la porte battante se refermer en ramenant votre bras et votre main vers vous en position de départ.

Tâche Mentale : Prenez la position de départ. Essayez de vous sentir en train de faire le mouvement que vous venez d'exécuter sans le faire réellement. Maintenant, estimez la facilité ou la difficulté avec laquelle vous étiez capable de faire cette tâche mentale.

Très difficile à sentir	Difficile à sentir	Assez difficile à sentir	Neutre (ni facile ni difficile)	Assez facile à sentir	Facile à sentir	Très facile à sentir

RESUME

Les recherches récentes sur les étiologies possibles du Trouble de l'Acquisition des Coordinations (TAC) émettent l'hypothèse d'un déficit de modèle interne. L'imagerie motrice, étant un état cognitif conscient permettant l'accès à la représentation interne d'un mouvement pendant sa phase de préparation, semble être alors une technique intéressante pour la rééducation de ce trouble psychomoteur.

Ce mémoire a donc pour objectif de proposer un protocole d'imagerie motrice pour deux patients présentant un TAC afin d'examiner l'intérêt que pourrait avoir cette technique innovante dans la rééducation des troubles de l'équilibre et d'une dysgraphie tout particulièrement

Mots clés : imagerie motrice, modèles internes du mouvement, contrôle moteur, Trouble de l'Acquisition des Coordinations, dysgraphie.

ABSTRACT

Recent research on Developmental Coordination Disorders's (DCD) etiology hypothesized a deficit in the internal model. Motor imagery is a conscious cognitive state that allows accessing the internal representation of a movement during its preparation. As such, it seems to be an interesting technique to this psychomotor disorder rehabilitation.

This paper describes a motor imagery protocol for two patients with a DCD and assesses the potential interest of this innovating technique in the rehabilitation of a balance disorder and a dysgraphia.

Key words : motor imagery, internal models, motor control, Developmental Coordination Disorder, dysgraphia