

Étalonnage du Test d'Imagerie Motrice Implicite 2^e version sur une population développementale française : le TIMI-2

Frédéric Puyjarinet^{1*} , Jean-François Connan² , Jessica Nesensohn³, Régis Soppelsa⁴, et Antoine Seilles⁵

¹ Institut de Formation en Psychomotricité de Montpellier, Faculté de Médecine de Montpellier-Nîmes, Université de Montpellier, France

² Laboratoire PSYCLE, Institut Supérieur de Rééducation Psychomotrice, Aix Marseille Université, France

³ Institut de Formation en Psychomotricité de Montpellier, Faculté de Médecine de Montpellier-Nîmes, Université de Montpellier, France

⁴ Institut de Formation en Psychomotricité de Toulouse, Département médecine, maïeutique et paramédical, Université Toulouse III Paul Sabatier, Toulouse, France

⁵ NaturalPad, Montpellier, France

Reçu le 22 février 2023, Accepté le 27 octobre 2023

Résumé– L'imagerie motrice (IM), qui renvoie à la simulation mentale d'une action et des sensations associées, constitue une voie privilégiée pour tester l'intégrité des modèles internes et, finalement, celle du système moteur. Souvent intégrés à des troubles tels que la paralysie cérébrale ou le trouble développemental de la coordination, les déficits d'IM doivent être recherchés dans une démarche de diagnostic de précision afin de mieux cerner le profil neuropsychologique de patients adressés en bilan, et pouvoir estimer en pré-intervention les chances de réussite d'une rééducation basée sur la simulation mentale de mouvements. Le manque d'outils d'évaluation dans le domaine a longtemps entravé la mise au jour de tels déficits par les cliniciens. Cet état de fait couplé à l'importance de créer de nouveaux tests ancrés dans les théories motrices et les modèles les plus récents imposent d'actualiser l'arsenal évaluatif des rééducateurs (psychomotriciens, kinés, professeurs d'activités physiques adaptées, etc.). Dans ce contexte, nous avons entamé l'étalonnage de plusieurs outils d'évaluation des capacités d'IM chez l'enfant, dont le Test d'Imagerie Motrice Implicite 2^e version (TIMI-2), qui sera décrit ici, en même temps que ses propriétés psychométriques.

Mots-clés : outil d'évaluation, rotation mentale, jugement de latéralité manuelle, trouble développemental de la coordination, enfants

Abstract - Development and validation of the Test of Implicit Motor Imagery 2nd version on a French developmental population: TIMI-2. Motor imagery (MI), which refers to the mental simulation of action and associated sensations, is an ideal way of testing the integrity of internal models and, ultimately, that of the motor system. Often associated with disorders such as cerebral palsy or developmental coordination disorder, MI deficits need to be investigated within a precision diagnostic approach, to better characterize the neuropsychological profile of individuals referred in therapy. The lack of assessment tools in this field has long hampered the identification of such deficits by clinicians. This situation, coupled with the importance of creating innovative tests rooted in the latest motor theories and conceptual models, means that professionals working in rehabilitation field (psychomotor therapists, physiotherapists, etc.) need to update their assessment toolbox. In this context, we have initiated the standardization and development of several MI skills assessment tools in children, including the Test of Implicit Motor Imagery 2nd version (TIMI-2), which will be described here, along with its psychometric properties.

Keywords: assessment tool, mental rotation, hand laterality judgment, developmental coordination disorder, children

*Auteur correspondant : f.puyjarinet@hotmail.fr

1 L'imagerie motrice

L'imagerie motrice (IM) est la capacité à simuler mentalement une action en l'absence de mouvement observable concomitant (Guillot, Hoyek, Louis, & Collet, 2012; Lebon, Byblow, Collet, Guillot, & Stinear, 2012). L'IM est régulièrement mise à profit dans le domaine de la performance sportive (*e.g.*, Morone *et al.*, 2022; Robin & Dominique, 2022), et présente également un intérêt certain –aujourd'hui largement documenté– dans les champs de la rééducation fonctionnelle, par exemple chez l'adulte cérébrolésé (Garcia Carrasco & Aboitiz Cantalapiedra, 2016; Guillot *et al.*, 2008; Lotze & Halsband, 2006; Ruffino, Papaxanthis, & Lebon, 2017). Pratiquée sous certaines conditions, l'IM contribue par ailleurs à l'amélioration des habiletés motrices chez des sujets porteurs de trouble développemental de la coordination ou TDC¹ (Blank *et al.*, 2019; Puyjarinet, 2019; Puyjarinet, Soppelsa, & Connan, 2020; Puyjarinet, Connan, Maury, & Soppelsa, 2023; Wilson *et al.*, 2016). Chercheurs et cliniciens s'y intéressent de manière croissante depuis les années 1990. Peu coûteuse d'un point de vue matériel et financier, la pratique de l'IM séduit progressivement les thérapeutes qui y voient une opportunité de mettre en pratique une approche ancrée sur des preuves scientifiques (López, Monge Pereira, Centeno, & Miangolarra Page, 2019; Lotze & Halsband, 2006).

2 Aspects dimensionnels de l'IM

L'IM est pluridimensionnelle. Il est fréquent, par exemple, de différencier la simulation de mouvement à la première personne (d'un point de vue interne) de l'imagerie à la troisième personne (d'un point de vue externe). Certains auteurs différencient par ailleurs l'imagerie kinesthésique (la simulation associée à des ressentis corporels) et l'imagerie visuelle (la simulation associée à une sollicitation préférentielle du système visuel). Il est également habituel d'établir un distinguo entre l'imagerie motrice explicite, et l'imagerie motrice implicite (*e.g.*, Lebon, Lotze, Stinear, & Byblow, 2012). La différence principale réside ici dans le fait qu'en IM explicite, le sujet est conscient de simuler une action. Ce qui n'est pas le cas en IM implicite. D'autres auteurs parlent aussi d'IM implicite lorsqu'il n'est pas demandé explicitement au sujet de produire des ressentis ou des

images mentales sur une tâche donnée. Dans le cadre du travail présenté ici, le paradigme expérimental qui a directement inspiré l'outil d'évaluation développé renvoie à la dimension implicite de l'IM.

3 Intérêts d'évaluer les capacités d'IM

La pratique de l'IM s'avère particulièrement pertinente en tant que technique de soin dans divers contextes pathologiques, surtout si elle est associée en alternance à de l'observation d'action et à de la pratique réelle (Monany, Papaxanthis, Guillot, & Lebon, 2022; Puyjarinet *et al.*, 2022; Wilson *et al.*, 2016). Mais avant d'envisager un entraînement basé sur la pratique de l'IM, il s'avère indispensable d'évaluer au préalable les capacités d'IM initiales du sujet (*i.e.*, avant un entraînement ou une prise en charge). Notons que les capacités d'IM renvoient ici à l'aptitude d'un individu à simuler mentalement une action par l'intermédiaire de différentes modalités sensorielles, et qui peuvent varier notamment chez l'enfant au cours du développement normal (*e.g.*, Spruijt, van der Kamp, & Steenbergen, 2015). En effet, il a été démontré chez l'enfant que l'évolution des capacités d'IM est étroitement associée au développement moteur lui-même (Adams, Lust, Wilson, & Steenbergen, 2014; Barhoun *et al.*, 2019; Caeyenberghs, Wilson, Van Roon, Swinnen, & Smits-Engelsman, 2009; Puyjarinet *et al.*, 2023; Smits-Engelsman & Wilson, 2013). Ainsi, plus les coordinations motrices évoluent sous les effets conjugués de l'âge et de la pratique, plus les capacités d'IM se développent en parallèle (Caeyenberghs *et al.*, 2009; Williams, Thomas, & Maruff, 2008). Évaluer les capacités d'IM revient donc à évaluer, ne serait-ce qu'*a minima*, l'intégrité des coordinations motrices. Un autre constat important réside dans le fait que, d'un point de vue clinique, plus le niveau initial des coordinations motrices est faible, plus les patients tirent profit d'une rééducation basée sur l'utilisation de l'IM en tant que méthode thérapeutique et progressent de façon significative sur le plan moteur (*e.g.*, Wilson *et al.*, 2016). La question est donc de savoir si le clinicien peut envisager en priorité une rééducation axée sur la pratique de l'IM ou non, sur la base du niveau initial des coordinations motrices et des capacités d'IM d'un sujet donné. Compte tenu de la rareté des tests d'évaluation ciblant les capacités d'IM explicite et implicite chez l'enfant, la conception et la validation de tels outils deviennent incontournables. Les auteurs du rapport d'expertise collective de l'INSERM dans le cadre du TDC abondent dans ce sens : « *Au regard des hypothèses prometteuses portant sur un déficit des modèles internes et de l'imagerie motrice, le groupe d'experts recommande de soutenir un travail de recherche développementale pour construire (puis étalonner et valider) des outils d'évaluation [...] en s'inspirant de tests existant déjà pour l'adulte* » (Rapport d'expertise INSERM, 2019, p. 81). Après avoir adapté et validé un questionnaire d'IM explicite (Puyjarinet *et al.*, 2023), nous nous proposons de développer et d'étalonner un outil évaluant cette fois les capacités d'IM implicite.

¹ Le TDC est un trouble neurodéveloppemental caractérisé par des difficultés importantes et persistantes dans les productions motrices entraînant une gêne dans les activités de la vie quotidienne (hygiène, repas, etc.), scolaires (écriture, dessin, géométrie, double-tâche) ou encore de loisirs. Même si la maladresse et la lenteur motrices sont, par nature, très souvent au premier plan, une symptomatologie psycho-affective y est souvent associée, ce qui en fait l'exemple typique de ce qu'est un trouble psychomoteur (Corraze, 1999). La prévalence est estimée à 5–6 % des enfants d'âge scolaire. La comorbidité est fréquente en regard d'autres troubles du neurodéveloppement comme le déficit d'attention/hyperactivité ou les troubles spécifiques des apprentissages (Expertise Collective INSERM, 2019).

4 Méthode

4.1 Participants

Le projet d'étalonnage du Test d'Imagerie Motrice Implicite 2nde version (TIMI-2) au sein d'une population développementale a fait l'objet d'une demande d'autorisation auprès d'un Comité de Protection des Personnes, avec avis favorable (CPP 2020/40, ID-RCB : 2020-A00827-32). La population d'étalonnage est constituée de 687 enfants (54 % de filles, âge moyen : 9,8 ans \pm 1,9) issus d'écoles publiques et privées des régions Ile-de-France, Occitanie et Provence-Alpes-Côte d'Azur, âgés de 7 ans 0 mois à 14 ans 11 mois. Les enfants inclus ne présentaient aucun problème médical ni pathologie connue (neurologique, neurodéveloppementale, psychiatrique) ou affection sensorielle. Les parents des enfants inclus ont donné leur accord *via* un formulaire de consentement éclairé. Par ailleurs, une notice relative à la description de l'étude a été transmise afin qu'enseignants, enfants et responsables légaux puissent en comprendre les objectifs principaux.

4.2 Matériel et procédure de standardisation

Le TIMI-2 est un nouvel outil d'évaluation directement issu du paradigme expérimental de jugement de latéralité manuelle, et qui fait suite au TIMI-1 (voir l'historique, l'intérêt et l'originalité du TIMI dans l'article consacré à sa première version dans Puyjarinet *et al.*, 2020). Nous avons opté pour le développement d'une version numérique afin de tenter de créer un outil plus objectif, en augmentant – si possible – la précision des mesures temporelles associées aux réponses des sujets. Les origines du TIMI-2 remontent aux travaux de Shepard et Metzler (1971), puis à ceux de Cooper et Shepard (1975). Il s'agit d'un test de rotation mentale mettant en jeu une partie du corps. Le test consiste à juger le plus rapidement possible si chaque main présentée à l'écran est une main droite ou une main gauche. Pour réussir la tâche, les participants déplacent « *le fantôme* » de leurs mains (Cooper & Shepard, 1975, p. 48), autrement dit ils doivent simuler mentalement les mouvements de leurs mains et les « comparer » au stimulus affiché à l'écran avant de prendre une décision.

Les caractéristiques des stimuli et leur ordre de présentation sont strictement identiques à ceux du TIMI-1. Les stimuli sont présentés successivement selon deux présentations : palmaire ou dorsale, et selon six angles différents : 0°, 60°, 120°, 180°, 240° ou 300° (Puyjarinet *et al.*, 2020). Pour répondre, le participant doit appuyer sur la flèche à l'écran correspondant à son choix : la flèche de droite s'il pense qu'il s'agit d'une main droite, ou la flèche de gauche dans le cas contraire (Fig. 1).

Sur l'écran d'accueil, l'examineur peut s'il le souhaite enregistrer les informations relatives au participant : âge, sexe, latéralité usuelle, etc. Sur l'écran suivant, les consignes sont explicitées. Le participant ou l'examineur peuvent les lire à haute voix. Les consignes doivent être suivies à la lettre, et reformulées au besoin, mais aucune autre information ne doit être donnée, excepté pour ce qui

relève des frappes digitales (voir section suivante). L'examineur est placé en face de l'enfant ou à côté. Il ne doit en aucun cas proposer explicitement à l'enfant d'effectuer une rotation mentale des mains. Une courte phase d'entraînement est proposée. Celle-ci peut être répétée autant de fois que nécessaire jusqu'à ce que l'enfant comprenne parfaitement les consignes. En général, cette phase d'essais est présentée deux fois au maximum. Les mains du participant doivent être positionnées conformément à la Figure 2.

Puis la passation formelle débute. Le professionnel ne devra pas mentionner le nombre d'items ($n = 48$) à l'enfant, et s'assurera tout au long de la passation que l'enfant ne regarde que l'écran (et pas ses mains). Il s'assura également que l'enfant n'effectue pas de mouvement manuel quel qu'il soit. Si tel est le cas, l'examineur répètera les consignes, et si le non-respect des règles persiste sur plus de trois items, la passation devra être stoppée. Après le 48^e item, un écran (Fig. 3) affiche automatiquement les performances du sujet, dont les trois principales variables à examiner : le Score Total (nombre d'items correctement réussis, maximum : 48), le Temps de Réponse Moyen (somme des temps de réponse à chaque item \div 48), et la Performance Globale (somme des points calculés à partir du temps de réponse sur chaque item selon le barème suivant : 4 points si la réponse juste intervient entre 0 et 1,99 secondes, 3 points si la réponse juste intervient entre 2,00 et 2,99 secondes, 2 points si la réponse juste intervient entre 3,00 et 3,99 secondes, et 1 point à partir de 4,00 secondes).

Enfin, à l'issue de la passation, l'adulte devra poser à l'enfant la question suivante : « Comment as-tu fait pour essayer de trouver les bonnes réponses à chaque fois ? » et noter la réponse par écrit. Cela permettra d'identifier la stratégie employée par l'enfant et de savoir s'il a effectivement utilisé l'IM ou une autre méthode (exemple : déterminer la latéralité d'un stimulus à partir du positionnement du pouce). Dans le cas où l'enfant n'utilise pas l'IM, aucune interprétation des résultats au TIMI-2 ne pourra évidemment être déduite. L'examineur sera également attentif aux éventuels problèmes de comportement, de motivation ou d'engagement dans la tâche de la part de l'enfant. Le cas échéant, il devra consigner ses observations sur la feuille de passation (*cf.* Annexes), afin de juger de la pertinence des résultats finaux selon la question centrale : les résultats sont-ils interprétables ou pas ?

L'administration du TIMI-2 dure environ 6 à 10 minutes, explications comprises. Après chaque utilisation, l'examineur devra fermer la page web du serveur qui héberge le TIMI-2 pour éviter tout problème d'ordre technique.

4.3 Configuration technique requise et précautions d'utilisation

Le TIMI-2 fonctionne sur tablette tactile ou smartphone et est hébergé sur un serveur, ce qui implique de pouvoir bénéficier d'une connexion internet de qualité

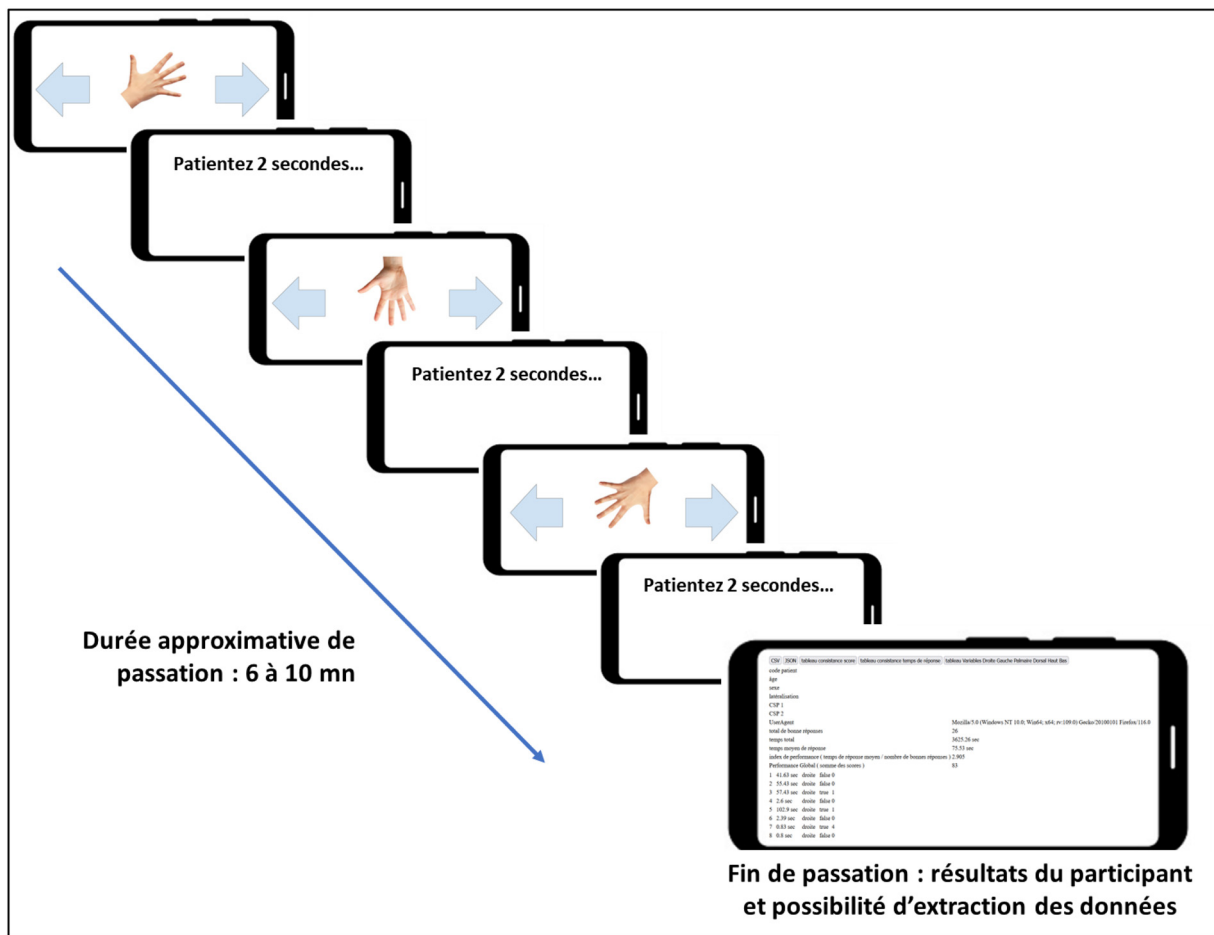


Fig. 1. Présentation succincte des stimuli du TIMI-2, avec en bas à droite l'écran final qui permet de récupérer les données relatives aux performances du sujet.



Fig. 2. Positionnement des mains durant la passation du TIMI-2. Cette condition correspond à la standardisation du test auprès des enfants constituant l'échantillon de l'étalonnage, et devra être respectée pour chaque passation.

(au moins 8 Mb/s) pour éviter tout problème de délais ou d'enregistrement. Une connexion médiocre entraînera des délais d'enregistrement qui viendront biaiser les performances du sujet, et finalement altérer de manière rédhivatoire l'interprétation des résultats. Toute notification doit par

ailleurs être bloquée pendant la passation du test, par exemple en paramétrant momentanément son smartphone sur le mode « Ne pas déranger » pour ne pas recevoir d'appel, de mail, ou de SMS qui pourraient compromettre l'enregistrement optimal des données, ou même déconcentrer le

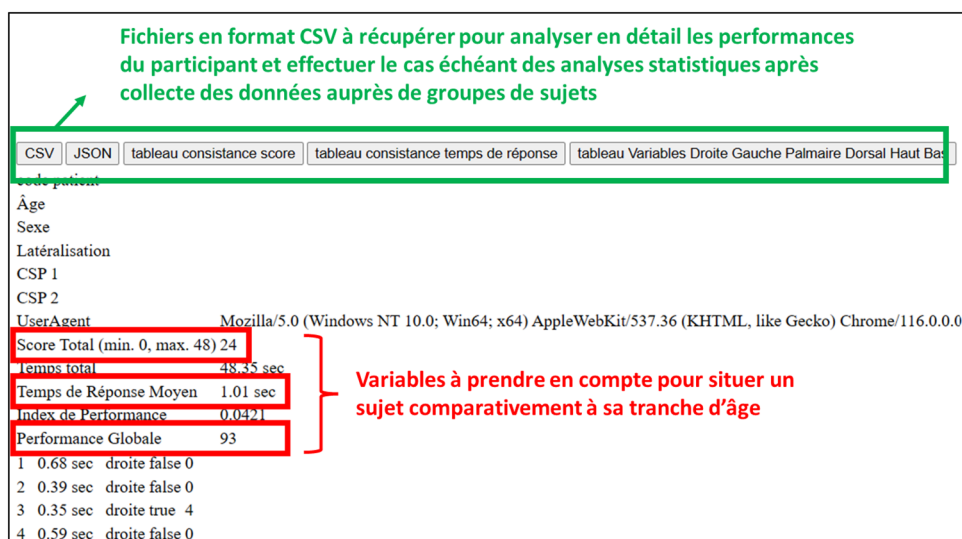


Fig. 3. Écran final apparaissant automatiquement après le 48^e item. Seules les variables visibles dans l'encadré rouge seront utiles pour le clinicien qui souhaite situer un patient comparativement à sa tranche d'âge, la variable la plus pertinente au final étant la Performance Globale.

participant. Les appareils fonctionnant sous des versions antérieures à *Android 11* (ou version 14.8.1 pour iOS et iPadOS) ne seront pas adaptés. En ce qui concerne l'écran de la tablette tactile ou du smartphone, celui-ci doit être suffisamment sensible pour que le moindre appui digital réalisé par le participant puisse être pris en compte. Les frappes digitales doivent être courtes, et ne doivent pas être dues à des glissements sur l'écran, à des appuis prolongés, ou gênées par l'ongle de l'index. L'examineur sera particulièrement vigilant quant à ces éléments lors de la phase d'essais, et corrigera l'enfant au besoin avant le début formel du test en lui fournissant les informations verbales et non verbales *ad hoc* (répétition des consignes, démonstration, etc.).

5 Analyse des données

5.1 Effets de l'âge, du sexe et de la latéralité

Afin d'évaluer le caractère développemental de l'outil, et par ailleurs l'impact éventuel du sexe et de la latéralité, les trois principales variables issues du TIMI-2 ont fait successivement l'objet d'analyses de variance (ANOVA) factorielles intégrant les facteurs Âge, Sexe, et Latéralité en tant que facteurs inter-sujets. Les trois mesures du TIMI-2 ainsi analysées étaient :

- le Score Total ;
- le Temps de Réponse Moyen ;
- la Performance Globale, nouvelle mesure qui n'était pas présente dans le TIMI-1.

Le détail du calcul pour chaque mesure est précisé plus haut dans la section « Matériel et procédure de standardisation ».

Lorsque le niveau de P était significatif, des tests *post-hoc* de Holm-Bonferroni avec des niveaux de P ajustés aux comparaisons multiples ont permis de préciser les différences entre les différents groupes d'âges.

Nous avons ensuite vérifié si les enfants répondaient au hasard ou non à l'aide d'un test binomial avec facteur dichotomique, pour lequel chaque réponse a 50 % de chance d'être choisie en théorie (probabilité = 0,50 pour chaque item). Les scores étaient considérés comme significativement supérieurs au niveau de chance lorsque le pourcentage de bonnes réponses se situait au-delà du seuil de 63 % (Spruijt *et al.*, 2015).

5.2 Propriétés psychométriques du TIMI-2

Tout développement d'un nouvel outil d'évaluation doit s'accompagner d'une vérification de ses principales propriétés psychométriques (Laveault & Grégoire, 2023). Ainsi, sensibilité, cohérence interne, fidélité test-retest, validité de contenu, validité de critère, validités convergente et divergente ont été testées, en plus d'une validation pathologique.

La sensibilité, appelée aussi finesse discriminative et qui correspond au pouvoir discriminant d'un outil psychométrique, permet de vérifier sa capacité à différencier les performances des sujets (Bernaud, 2007). Celle-ci a été évaluée à l'aide du delta (δ) de Fergusson (Broc, Carlsberg, Cazauviel, Faury, & Loyal, 2016; Hankins, 2007, 2008), qui varie de 0 (absence totale de discrimination), à 1 (discrimination parfaite). La cohérence interne a été évaluée à l'aide du coefficient alpha (α) de Cronbach. La fidélité test-retest a été évaluée *via* un coefficient de corrélation intra-classe (ICC). La Performance Globale a été prise en compte pour ces analyses.

La validité de contenu a été testée, conformément à la procédure utilisée dans d'autres travaux (*e.g.*, Spruijt *et al.*, 2015; ter Horst, Van Lier, & Steenbergen, 2010), en comparant à l'aide de t -tests les temps de réponse sur les items dont les mains sont orientées à 0°, 60°, et 300° à ceux

dont les stimuli étaient orientés à 120°, 180°, et 240°. La même procédure a ensuite été appliquée en prenant en compte le nombre de bonnes réponses (Score Total).

La validité de critère a été évaluée en testant des modèles de régression logistique sur un sous-échantillon de 78 participants (moyenne d'âge : 8,7 ans \pm 1,2 ; 36 filles) afin de vérifier si les performances au TIMI-2 permettaient de prédire les performances en dextérité manuelle évaluées à la faveur d'un test dédié : le *Purdue Pegboard* (Béguet & Albaret, 1998). Pour chacune des quatre tâches du *Purdue Pegboard* (en tenant compte de la moyenne des trois essais sur chacune des tâches), les sujets ont été divisés en deux groupes sur la base de la médiane de leurs performances : ceux qui étaient les plus performants (sujets « Forts »), et ceux qui étaient les moins performants (sujets « Faibles »). Pour évaluer la validité convergente, un questionnaire d'évaluation des capacités d'IM validé – le QUIMOT (Puyjarinet *et al.*, 2023) – a été administré à un sous-groupe de 42 enfants (moyenne d'âge : 9,3 ans \pm 1,1 ; 24 filles) en plus du TIMI-2. Un test de corrélation a permis d'estimer le lien entre le score de Performance Globale au TIMI-2 et les résultats obtenus au QUIMOT. La validité divergente a été testée en utilisant l'épreuve des blocs de Corsi (Fournier & Albaret, 2013) comme mesure des capacités de mémoire de travail visuo-spatiale en tant que domaine cognitif supposément différent de l'IM, parallèlement à l'administration du TIMI-2 sur un sous-groupe de 45 enfants (moyenne d'âge : 9,1 ans \pm 1,0 ; 28 filles). Le Tau de Kendall (τ) a été utilisé pour tester le degré (ou l'absence) d'association entre les mesures.

Une validation pathologique a été effectuée en administrant le TIMI-2 à 59 enfants (moyenne d'âge : 9,1 ans \pm 1,5 ; 29 filles) dissociés en deux groupes : un groupe de sujets ($n = 28$) diagnostiqués avec un TDC selon les critères du DSM-5 (American Psychiatric Association, 2013), et un groupe de sujets normo-typiques ($n = 31$) appariés en âge et en sexe ($P > 0,41$). Des tests de comparaison ont ensuite été appliqués pour vérifier les éventuelles différences de performances entre les deux groupes.

Afin de comparer les résultats obtenus au TIMI-2 sur tablette tactile et sur smartphone, les performances de 486 participants (moyenne d'âge : 9,0 ans \pm 1,3 ; 268 filles) appariés en âge et en sexe (t -tests : $P > 0,54$) ont été comparées en les distinguant selon l'appareil utilisé au cours de la passation du TIMI-2 : tablettes tactiles ($n = 187$) ou smartphones ($n = 299$). Des tests de comparaison ont là aussi été appliqués afin de vérifier d'éventuelles différences.

Enfin, nous avons vérifié si les performances au TIMI-2 différaient de celles du TIMI-1 en comparant à l'aide d'un t -test les performances obtenues par un groupe d'enfants au TIMI-1 ($n = 232$) à celles d'un groupe d'enfants ayant passé le TIMI-2 ($n = 281$), appariés en âge et en sexe (t -tests : $P > 0,91$).

Toutes les conditions d'application des différentes procédures statistiques utilisées ont été vérifiées (*e.g.*, normalité *via* le test de Shapiro-Wilk, test de Levene pour l'homogénéité des variances, etc.) et ont conditionné l'utilisation de tests paramétriques ou non paramétriques. Pour les ANOVA, lorsque la condition d'homogénéité des

variances n'était pas rencontrée, des transformations non-linéaires (*e.g.*, transformation logarithmique, ou élévation au cube) ont permis d'obtenir des variances homogènes (tests de Levene $> 0,05$). Des ANOVA paramétriques ont donc été appliquées dans tous les cas, y compris en cas de violation de la normalité, compte tenu de la robustesse des ANOVA dans ce type de situations (Blanca, Alarcón, Arnau, Bono, & Bendayan, 2017; Schmider, Ziegler, Danay, Beyer, & Markus Bühner, 2010). Pour les tests de comparaison (t -tests), la correction de Welch a été appliquée en cas d'hétéroscédasticité observée entre les deux groupes comparés. Les analyses statistiques ont été réalisées avec les logiciels JASP (JASP TEAM, 2016) et R (R Core Team, 2024). Pour l'ensemble des résultats, le seuil de significativité a été fixé à $\alpha < 0,05$.

6 Résultats

Les données descriptives apparaissent dans le [Tableau 1](#) pour la répartition des sujets selon les tranches d'âge, dans le [Tableau 2](#) pour la répartition des catégories socio-professionnelles des parents, et dans les [Tableaux 3, 4](#) et [5](#) pour ce qui est des données descriptives des trois principales variables prises en compte pour les analyses statistiques.

6.1 Effets de l'âge, du sexe et de la latéralité, et résultats des tests binomiaux

Des ANOVA factorielles ont été utilisées afin d'évaluer l'impact éventuel de l'âge, du sexe et de la latéralité sur chacune des trois variables principales extraites du TIMI-2 : le Score Total, le Temps de Réponse Moyen, et la Performance Globale.

6.1.1 Score Total

L'ANOVA montre un effet principal du facteur Âge sur le Score Total [$F_{(5,651)} = 24,87$; $P < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,16$]. Les analyses *a posteriori* révèlent des différences significatives entre 7 ans et chacune des autres tranches d'âge ($P < 0,01$), et entre 8 ans et 10-11-12 ans, 8 et 13 ans, et 8 et 14 ans (tous les $P < 0,05$). Aucune autre différence n'est observée entre les autres tranches d'âges ($P > 0,24$). L'ANOVA ne met pas en évidence d'effet principal du facteur Sexe [$F_{(1,651)} = 1,50$; $P = 0,22$; $\eta_p^2 = 0,001$], ni du facteur Latéralité [$F_{(2,651)} = 1,80$; $P = 0,16$; $\eta_p^2 = 0,002$]. Les interactions Sexe x Latéralité [$F_{(2,651)} = 2,61$; $P = 0,07$; $\eta_p^2 = 0,003$], Sexe x Âge [$F_{(5,651)} = 2,08$; $P = 0,06$; $\eta_p^2 = 0,011$], Âge x Latéralité [$F_{(10,651)} = 0,67$; $P = 0,75$; $\eta_p^2 = 0,019$], et Âge x Sexe x Latéralité [$F_{(9,651)} = 1,04$; $P = 0,40$; $\eta_p^2 = 0,017$] ne sont pas significatives non plus.

Les résultats des tests binomiaux – permettant d'estimer si les sujets ont répondu ou non au hasard – montrent que les enfants de 7 ans ont répondu au-dessus du niveau du hasard, [68,7 % de probabilité de bonnes réponses ; $P < 0,05$; IC à 95 % : (53,7 % ; 81,3 %)], tout comme les enfants de 8 ans [77,1 % de probabilité de bonnes réponses ; $P < 0,001$;

Tableau 1. Répartition des enfants de l'échantillon.

Tranche d'âge	Âges correspondant	Filles	Garçons	Total
7 ans	7 ans 0 mois – 7 ans 11 mois	72	58	130
8 ans	8 ans 0 mois – 8 ans 11 mois	65	57	122
9 ans	9 ans 0 mois – 9 ans 11 mois	70	60	130
10 ans	10 ans 0 mois – 10 ans 11 mois	88	67	155
11 ans	11 ans 0 mois – 11 ans 11 mois	25	25	50
12 ans	12 ans 0 mois – 12 ans 11 mois	13	18	31
13 ans	13 ans 0 mois – 13 ans 11 mois	22	19	41
14 ans	14 ans 0 mois – 14 ans 11 mois	17	11	28
Total		372	315	687

Tableau 2. Répartition selon les catégories socio-professionnelles des parents.

Catégorie socioprofessionnelle	Pourcentage de l'échantillon Parent 1	Pourcentage de l'échantillon Parent 2	Donnée INSEE 2022
Agriculteur exploitant	1,6	0,6	1,6
Artisans, commerçants, chef d'entreprise	18,0	10,5	6,8
Cadres, professions intellectuelles supérieures	26,2	18,6	21,7
Professions intermédiaires	9,6	10,6	24,6
Employés	34,2	33,1	26,0
Ouvriers	5,2	5,4	19,0
Autres	NA	NA	0,4

NA : non applicable.

Tableau 3. Données descriptives pour le Score Total en fonction de l'âge. NB : les enfants de 10 ans, 11 ans et 12 ans sont regroupés au sein d'une même tranche d'âge compte tenu de l'absence de différence statistiquement significative observée sur plusieurs variables reflétant le niveau des capacités d'IM.

Tranches d'âge	Score Total					
	7 ans	8 ans	9 ans	10-11-12 ans	13 ans	14 ans
Moyenne	33,06	37,26	40,17	41,00	41,75	43,14
Médiane	33,00	40,00	42,00	43,00	43,00	43,00
Écart-type	8,01	8,51	6,46	6,63	5,33	3,72
Erreur standard de la moyenne	0,70	0,77	0,56	0,43	0,83	0,71
Minimum	18,00	14,00	20,00	19,00	25,00	32,00
Maximum	48,00	48,00	48,00	48,00	48,00	48,00
Quartile 1	25,25	30,25	37,00	37,75	41,00	41,50
Quartile 3	40,00	44,00	45,00	46,00	45,00	46,00

IC à 95 % : (62,6 % ; 87,9 %)], les enfants de 9 ans [83,3 % de probabilité de bonnes réponses ; $P < 0,0001$; IC à 95 % : (69,7 % ; 92,5 %)], les enfants de 10-11-12 ans, ceux de 13 ans [87,5 % de probabilité de bonnes réponses ; $P < 0,0001$; IC à 95 % : (74,7 % ; 95,2 %)], et enfin ceux de 14 ans [89,5 % de probabilité de bonnes réponses ; $P < 0,0001$; IC à 95 % : (77,3 % ; 96,5 %)].

6.1.2 Temps de Réponse Moyen

Les résultats indiquent que le facteur Âge impacte de façon significative le Temps de Réponse Moyen [$F_{(5,651)} = 44,25$; $P < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,25$]. Les analyses *a*

posteriori révèlent des différences significatives entre chacune des tranches d'âges ($P < 0,01$), excepté pour la comparaison entre les tranches d'âges de 7 et 8 ans d'une part, et de 8 et 9 ans d'autre part ($P > 0,09$). Aucun effet principal significatif des facteurs Sexe [$F_{(1,651)} = 0,83$; $P = 0,36$; $\eta_p^2 = 0,000$], et Latéralité [$F_{(2,651)} = 0,78$; $P = 0,45$; $\eta_p^2 = 0,004$] n'est observé. Aucun effet n'est décelé non plus au niveau des interactions Sexe x Latéralité [$F_{(2,651)} = 1,65$; $P = 0,19$; $\eta_p^2 = 0,003$], Sexe x Âge [$F_{(5,651)} = 0,61$; $P = 0,69$; $\eta_p^2 = 0,004$], Âge x Latéralité [$F_{(10,651)} = 0,68$; $P = 0,74$; $\eta_p^2 = 0,01$], et Âge x Sexe x Latéralité [$F_{(9,651)} = 0,50$; $P = 0,87$; $\eta_p^2 = 0,008$].

Tableau 4. Données descriptives pour le Temps de Réponse Moyen en fonction de l'âge. NB : les enfants de 10 ans, 11 ans et 12 ans sont regroupés au sein d'une même tranche d'âge compte tenu de l'absence de différence statistiquement significative observée sur plusieurs variables reflétant le niveau des capacités d'IM.

Tranches d'âge	Temps de Réponse Moyen (s)					
	7 ans	8 ans	9 ans	10-11-12 ans	13 ans	14 ans
Moyenne	4,71	4,22	4,00	3,35	2,67	2,13
Médiane	4,41	4,07	3,71	3,24	2,47	2,05
Écart-type	1,68	1,64	1,31	1,05	0,87	0,47
Erreur standard de la moyenne	0,14	0,14	0,11	0,06	0,13	0,09
Minimum	1,22	1,89	2,12	1,21	1,39	1,24
Maximum	9,61	9,58	8,16	8,17	5,43	3,07
Quartile 1	3,60	3,22	2,97	2,53	2,03	1,79
Quartile 3	5,42	5,40	4,68	3,97	3,25	2,32

Tableau 5. Données descriptives pour la Performance Globale en fonction de l'âge. NB : les enfants de 10 ans, 11 ans et 12 ans sont regroupés au sein d'une même tranche d'âge compte tenu de l'absence de différence statistiquement significative observée sur plusieurs variables reflétant le niveau des capacités d'IM.

Tranches d'âge	Performance Globale					
	7 ans	8 ans	9 ans	10-11-12 ans	13 ans	14 ans
Moyenne	63,77	78,01	89,36	104,09	125,75	148,00
Médiane	62,00	77,00	84,00	102,00	127,00	147,00
Ecart-type	19,34	27,14	27,28	28,01	30,15	17,96
Erreur standard de la moyenne	1,69	2,45	2,39	1,82	4,71	3,45
Minimum	24,00	26,00	35,00	43,00	73,00	100,00
Maximum	118,00	150,00	152,00	175,00	179,00	179,00
Quartile 1	51,00	56,25	69,00	85,00	99,00	138,50
Quartile 3	74,00	94,75	111,75	123,00	152,00	159,50

6.1.3 Performance Globale

Le facteur Âge a un impact significatif sur la Performance Globale [$F_{(5,651)} = 82,98$; $P < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,38$]. Les analyses *a posteriori* mettent en avant des différences de performances entre chacune des tranches d'âge ($P < 0,001$). L'interaction Sexe x Latéralité n'est pas significative [$F_{(2,651)} = 3,11$; $P = 0,05$; $\eta_p^2 = 0,01$]. Les facteurs Latéralité [$F_{(2,651)} = 0,27$; $P = 0,76$; $\eta_p^2 = 0,001$], Sexe [$F_{(1,651)} = 0,14$; $P = 0,70$; $\eta_p^2 = 0,000$], et les interactions, Sexe x Âge [$F_{(5,651)} = 0,56$; $P = 0,72$; $\eta_p^2 = 0,003$], Âge x Latéralité [$F_{(10,651)} = 0,30$; $P = 0,98$; $\eta_p^2 = 0,015$], et Âge x Sexe x Latéralité [$F_{(9,651)} = 0,91$; $P = 0,51$; $\eta_p^2 = 0,015$] n'influencent pas la Performance Globale. Les résultats des sujets de l'échantillon pour chaque tranche d'âge et chacune des trois variables du TIMI-2 (*i.e.*, Score Total, Temps de Réponse Moyen et Performance Globale) apparaissent dans la [Figure 4](#).

6.2 Propriétés psychométriques

6.2.1 Sensibilité

Les δ de Fergusson indique que le TIMI-2 discrimine de manière quasi-optimale les sujets entre eux pour ce qui concerne la Performance Globale ($\delta = 0,99$), ce qui indique

dans tous les cas que le test détecte très efficacement les différences de performance les plus infimes entre les participants.

6.2.2 Cohérence interne

La cohérence interne a été évaluée à l'aide du coefficient alpha (α) de Cronbach en tenant compte de la Performance Globale, et se révèle très satisfaisante [$\alpha = 0,93$; IC à 95 % : (0,92 ; 0,94)]. L'homogénéité interne a été testée à l'aide d'un coefficient de corrélation intra-classe (*ICC*) en distinguant les scores obtenus sur les items pairs ($n = 24$) des scores obtenus sur les items impairs ($n = 24$), et se révèle également très satisfaisante [$ICC = 0,87$; $P < 0,001$; IC à 95 % : (0,83 ; 0,90)].

6.2.3 Fidélité test-retest

Un sous-groupe de 22 sujets (moyenne d'âge : 10,1 ans \pm 1,8 ; 10 filles) a bénéficié d'une seconde passation du TIMI-2 dans un délai compris entre 2 heures et vingt-et-un jours après la première administration. Le coefficient de corrélation intra-classe (*ICC*) indique, selon [Cicchetti \(1994\)](#) et [Shrout \(1998\)](#) une fidélité test-retest particulièrement satisfaisante [$ICC = 0,94$; IC à 95 % : (0,93 ; 0,96)].

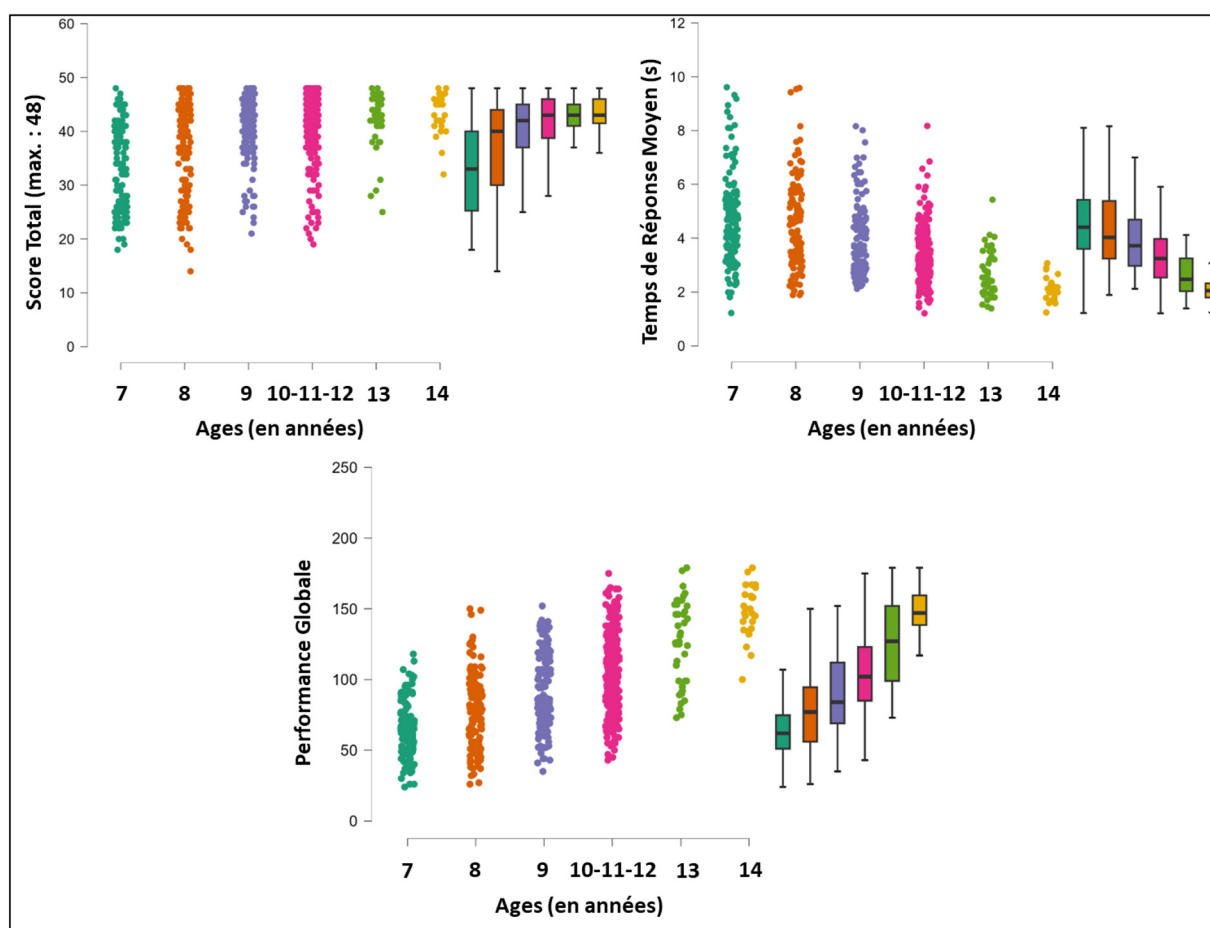


Fig. 4. Répartitions des performances pour chaque tranche d'âge sur chacune des trois principales variables du TIMI-2 (variables non transformées).

6.2.4 Validité de contenu

Nous avons comparé les temps de réponse, puis le nombre de bonnes réponses sur les items dont les mains sont orientées à 0° , 60° , et 300° à ceux dont les stimuli étaient orientés à 120° , 180° , et 240° . Le résultat du test de comparaison non paramétrique indique clairement que le temps de réponse est supérieur lorsque les stimuli non conformes aux caractéristiques biomécaniques apparaissent à l'écran [$P < 0.001$; Corrélation bisérielle de rang = $-0,37$; IC à 95 % : ($-0,34$; $-0,40$)]. De manière analogue, une différence est détectée concernant le nombre de bonnes réponses, qui est plus faible pour les items non congruents sur le plan biomécanique [$P < 0,001$; Corrélation bisérielle de rang = $-0,37$; IC à 95 % : ($0,10$; $0,21$)].

6.2.5 Validité de critère

Les résultats des modèles de régression montrent que les performances au TIMI-2 (évaluées *via* le score de Performance Globale) prédisent les performances au Purdue Pegboard pour la tâche réalisée avec la main dominante ($P < 0,01$; $X^2 = 8,46$; Nagelkerke $R^2 = 0,13$; $AIC = 102,38$), pour la tâche réalisée avec la main non

dominante ($P < 0,001$; $X^2 = 13,52$; Nagelkerke $R^2 = 0,21$; $AIC = 97,79$), pour la tâche des mettant en jeu les deux mains simultanées ($P < 0,01$; $X^2 = 8,45$; Nagelkerke $R^2 = 0,13$; $AIC = 102,85$), et également pour la tâche d'assemblage ($P < 0,001$; $X^2 = 11,36$; Nagelkerke $R^2 = 0,18$; $AIC = 100,77$) (Fig. 5).

6.2.6 Validité convergente

Lorsqu'elle est vérifiée, cette forme de validité reflète le fait que deux outils distincts mais évaluant le même concept sont corrélés. Le résultat du test de corrélation non paramétrique indique que le score de Performance Globale au TIMI-2 est significativement corrélé à l'index de performance obtenu sur le QUIMOT ($\rho = -0,43$; $P = 0,001$).

6.2.7 Validité divergente

Cette forme de validité permet de vérifier l'absence – ou le faible degré – d'association entre deux mesures conçues pour des construits différents. Aucune corrélation n'a été retrouvée entre le score de Performance Globale au TIMI-2 et les performances brutes ou normalisées aux blocs de Corsi (tous les $P > 0,23$).

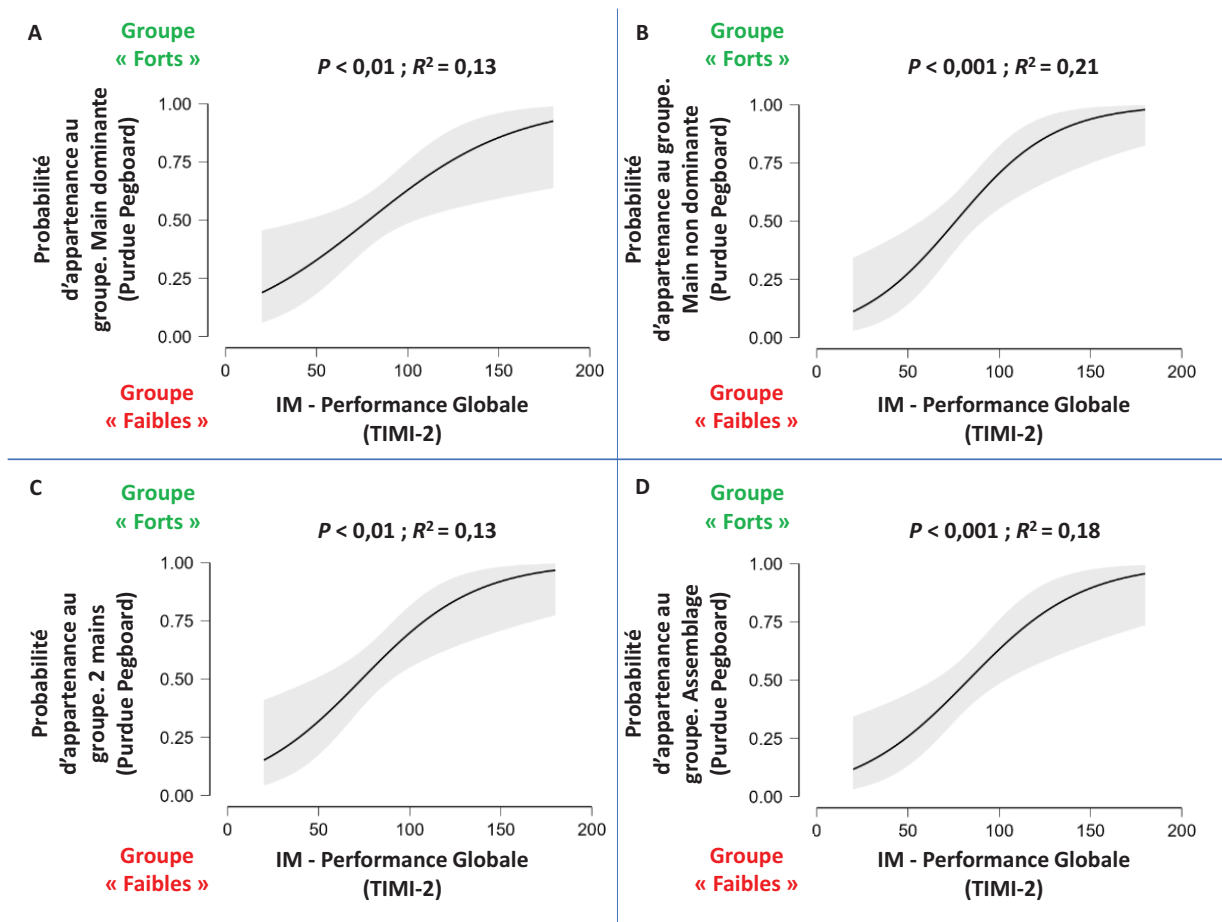


Fig. 5. Résultats des modèles de régression logistique : courbes de probabilité associées à l'appartenance au groupe (sujets « Forts » versus sujets « Faibles »). L'axe des ordonnées indique la probabilité d'appartenir à l'un ou à l'autre de ces groupes pour chacune des quatre tâches du Purdue Pegboard : la tâche de la main dominante (panel A), la tâche de main non dominante (panel B), l'épreuve des deux mains simultanées (panel C), et l'épreuve d'assemblage (panel D). L'axe des abscisses indique pour chaque panel le score de Performance Globale au TIMI-2 pour tous les sujets ($n = 78$). Les zones grises correspondent aux intervalles de confiance à 95 %.

6.2.8 Validation pathologique

Les résultats des tests de comparaison indiquent que les sujets TDC ont de moins bonnes performances sur chacune des trois variables extraites du TIMI-2 (Fig. 6) : Score Total ($W = 677,50$; $P < 0,001$; Corrélation bisérielle de rang = 0,56), Temps de Réponse Moyen [$t_{(57)} = -3,13$; $P < 0,01$; $d = -0,81$], et Performance Globale [$t_{(45,64)} = 5,12$; $P < 0,001$; $d = 1,31$]. Ces différences sont importantes, puisque les tailles d'effet s'échelonnent entre un niveau modéré pour le Score Total et un niveau considéré comme important pour le Temps de Réponse Moyen et la Performance Globale.

6.2.9 Comparaison tablettes tactiles versus smartphones

Les résultats montrent que, quelle que soit la variable prise en compte (Score Total, Temps de Réponse Moyen, ou Performance Globale), aucune différence n'apparaît entre les deux groupes d'enfants (tous les $P > 0,12$). Le TIMI-2 peut donc être utilisé indifféremment avec une tablette tactile ou un smartphone.

6.2.10 Comparaison TIMI-1 versus TIMI-2

Les résultats montrent que les enfants du groupe TIMI-2 obtiennent un Score Total supérieur en moyenne à ceux du groupe TIMI-1 ($P < 0,001$; corrélation bisérielle de rang = -0,19), et un Temps de Réponse Moyen plus élevé ($P < 0,001$; corrélation bisérielle de rang = -0,68).

7 Discussion

L'objectif principal de cette étude était d'adapter en format numérique une tâche utilisée régulièrement en laboratoire dans le domaine de l'évaluation de l'IM implicite. Le second objectif était de tester les propriétés psychométriques du test ainsi créé.

À la lumière des résultats obtenus sur les ANOVA, il apparaît nettement que le TIMI-2 discrimine des différences de performances en fonction de l'âge des participants, particulièrement pour ce qui concerne le score de Performance Globale. Celui-ci apparaît de fait comme la variable la plus sensible du TIMI-2. Les résultats des tests binomiaux indiquent quant à eux que les enfants – même

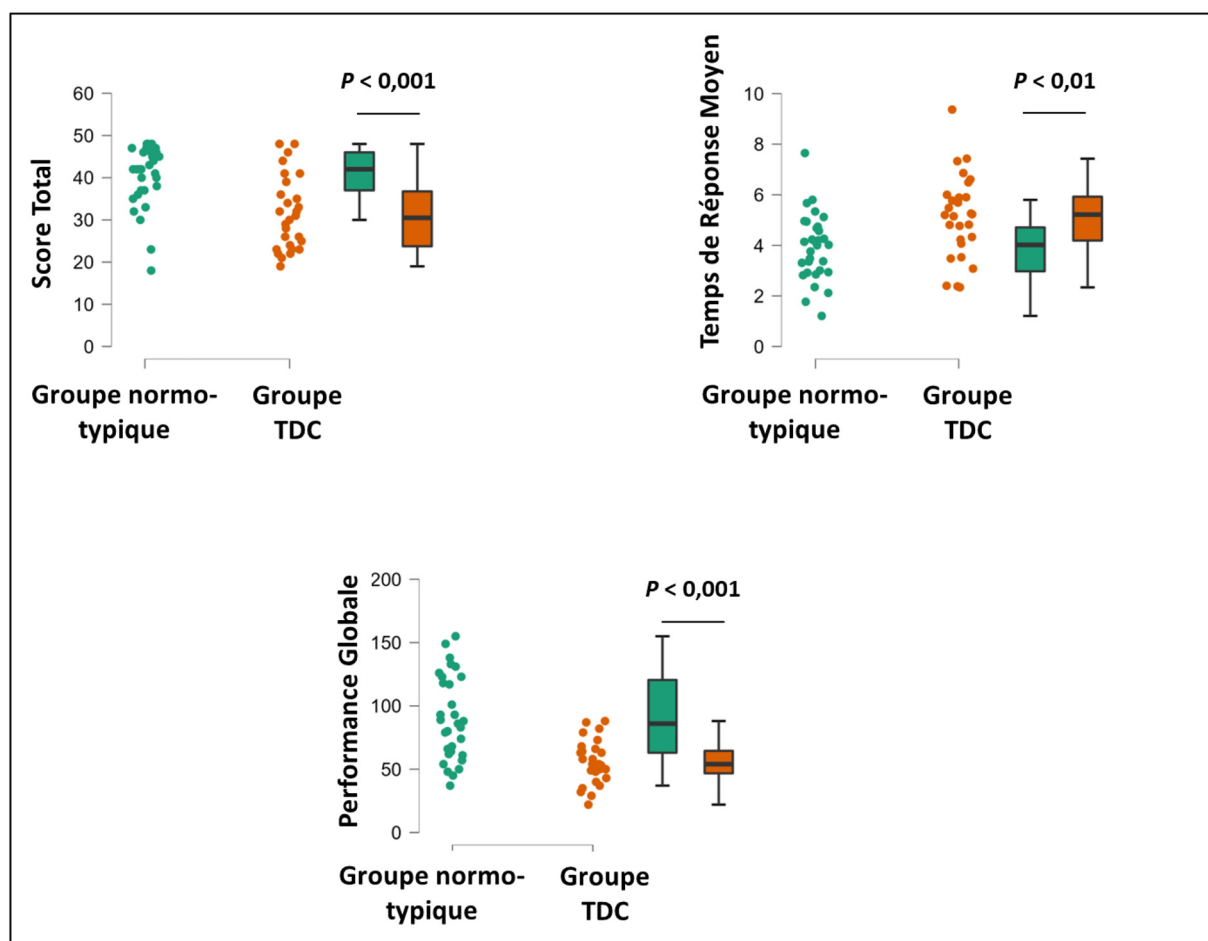


Fig. 6. Résultats des tests de comparaison entre le groupe de sujets normo-typiques ($n = 31$) et le groupe de sujets TDC ($n = 28$) vis-à-vis des performances au TIMI-2. Pour chacune des trois variables, les enfants avec TDC obtiennent des performances plus dégradées que les sujets normo-typiques, avec des tailles d'effet modérées à élevées, voire une taille d'effet très élevée pour la Performance Globale.

les plus jeunes – ne répondent pas au hasard, et que la probabilité de répondre correctement augmente avec l'âge. L'outil présente donc un intérêt évident sur le plan développemental, et confirme une nouvelle fois que les capacités d'IM implicite émergent autour de 7 ans, et se développent parallèlement à l'avancée en âge (Smits-Engelsman & Wilson, 2013; Spruijt *et al.*, 2015). Globalement, la latéralité et le sexe n'ont en revanche aucun impact sur les trois variables étudiées (excepté pour ce qui est de la Performance Globale où le résultat est quasiment significatif), ce qui avait déjà été observé dans le cadre de l'étalonnage du TIMI-1 (Puyjarinet *et al.*, 2020).

Concernant les données psychométriques, il apparaît que la sensibilité est très élevée, et que le test discrimine ainsi de manière particulièrement satisfaisante les sujets lorsque l'on prend en compte la Performance Globale. La cohérence interne est également élevée, tout comme la fidélité test-retest, ce qui autorise une réévaluation d'un sujet à court terme (dans un délai inférieur à un mois si nécessaire) sans compromettre les résultats (absence d'effet d'apprentissage). Les mesures de fidélité sont donc globalement très satisfaisantes.

Concernant l'étude de validité de contenu, nous avons procédé de la même façon que pour d'autres travaux qui ont montré que les performances des participants sur les épreuves de rotation mentale – similaires au TIMI-2 – se dégradent significativement lorsque les mains-stimuli sont présentées de manière incongrue sur le plan biomécanique (*i.e.*, avec une orientation à 120° , 180° , et 240°). Lorsque les stimuli sont orientés à 0° , 60° , et 300° , les performances en IM sont meilleures, ce qui est conforme aux données existantes (Spruijt *et al.*, 2015; ter Horst *et al.*, 2010). Il est admis que ces différences de performance sont considérées comme la signature de l'utilisation de l'IM, et ne sont pas retrouvées lorsqu'une stratégie autre que l'IM est utilisée pour résoudre la tâche (Parsons, 1994; Shenton, Schwoebel, & Coslett, 2004; Sirigu & Duhamel, 2001; Spruijt *et al.*, 2015; ter Horst *et al.*, 2010). Ces résultats attestent que les enfants ont bien utilisé leurs capacités d'IM implicite, et que le TIMI-2 mesure bien ce qu'il est censé mesurer.

L'étude de validité de critère met en évidence un lien très étroit entre les performances au TIMI-2 et le niveau de dextérité digitale et manuelle évaluée à la faveur d'un test dédié et validé (le *Purdue Pegboard*, Béguet & Albaret,

1998). Ces résultats sont analogues à ceux obtenus sur l'étude de validité de critère du TIMI-1 vis-à-vis du subtest « dextérité manuelle » du M-ABC 2 (Marquet-Doléac, Soppelsa, & Albaret, 2016 ; Puyjarinet *et al.*, 2020). Ces résultats sont également consistants avec ceux de travaux antérieurs qui attestent que l'évolution des capacités d'IM est étroitement associée au développement des coordinations motrices en conditions réelles (Caeyenberghs *et al.*, 2009 ; Smits-Engelsman & Wilson, 2013).

Concernant la validité convergente, les résultats indiquent que les performances sur les deux outils utilisés (TIMI-2 et QUIMOT) sont liées. Au regard de la taille de l'effet observé, cette relation peut toutefois être considérée comme modérée (Cohen, 1988). Ils n'évaluent donc très probablement pas les mêmes dimensions de l'IM, le TIMI-2 étant un test d'IM implicite qui sollicite un codage visuel des stimuli, alors que le QUIMOT évalue explicitement l'IM *via* un codage interne des réponses.

De manière intéressante, il apparaît que les résultats de l'étude de validité divergente sont similaires en tous points à ceux de l'étude menée sur le TIMI-1 (Puyjarinet *et al.*, 2020). Ils montrent que les deux tests administrés – TIMI-2 et blocs de Corsi – n'évaluent pas les mêmes processus cognitifs : IM implicite pour l'un, et mémoire de travail visuo-spatiale pour l'autre. Ce constat est compatible avec les données pléthoriques issues des travaux en neuropsychologie qui montrent que les processus cérébraux sont organisés en modules, lesquels peuvent être indépendants les uns des autres (*e.g.*, Reed & Warner-Rogers, 2008).

Au sujet de l'étude de validation pathologique, les résultats montrent clairement que le TIMI-2 permet de différencier des enfants porteurs de TDC d'autres qui en sont exempts. Plusieurs travaux utilisant ce même paradigme expérimental avaient rapporté des résultats identiques, tant chez l'enfant que chez l'adulte (voir Barhoun *et al.*, 2019, et Barhoun *et al.*, 2021 pour des méta-analyses). Il est à noter toutefois que tous les sujets avec TDC ne semblent pas en difficulté sur le TIMI-2 (voir Fig. 6). Plusieurs enfants se montrent en effet au moins aussi performants que leurs pairs normo-typiques. Par conséquent, le TIMI-2 paraît particulièrement pertinent pour affiner un diagnostic TDC. Car au-delà des caractéristiques cliniques qui contribuent fondamentalement au diagnostic de ce trouble neurodéveloppemental fréquent (American Psychiatric Association, 2013), il devient essentiel de caractériser les profils neuropsychologiques sous-jacents. L'objectif est ici en filigrane de tenir compte de la grande hétérogénéité inter-individuelle observée dans ce trouble, et de pouvoir construire des projets de soins individualisés dépendant des particularités cognitives de chacun (Adams *et al.*, 2014 ; Barhoun *et al.*, 2019 ; Blank *et al.*, 2019).

La comparaison entre le TIMI-1 et le TIMI-2 indique que les deux outils diffèrent sur les variables étudiées. Pour ce qui concerne le Temps de Réponse Moyen, les différences observées sont très probablement liées aux

conditions d'enregistrement des réponses des deux outils qui ne sont pas identiques : enregistrement manuel par l'examineur *via* l'observation de l'enfant d'un côté (TIMI-1) *versus* enregistrement automatique par la tablette de l'autre (TIMI-2). Cette dernière modalité d'enregistrement paraît forcément plus objective et précise. Quant au Score Total plus élevé observé sur le TIMI-2, une des hypothèses explicatives serait associée au matériel utilisé, plus ludique pour le TIMI-2 que pour le TIMI-1, et probablement plus engageant sur le plan motivationnel et attentionnel. Quoi qu'il en soit, ces résultats montrent sans ambiguïté que les utilisateurs du TIMI-2 ne devraient pas utiliser les normes relatives au TIMI-1, et *vice versa*.

7.1 Repères normatifs

Les données relatives au Score Total et au Temps de Réponse Moyen ne se distribuent pas selon une loi normale (tests de Shapiro-Wilk : $P < 0.05$). Pour ces deux variables, les utilisateurs du TIMI-2 se référeront aux quartiles afin de situer un sujet par rapport à sa tranche d'âges (Tab. 3 et 4). En revanche, pour ce qui relève de la Performance Globale, qui constitue le véritable reflet des capacités d'IM compte tenu de la sensibilité de cette variable à l'âge, les utilisateurs du TIMI-2 devront prendre en compte les moyennes et écarts-type du Tableau 5, en appliquant la formule classique [(résultat du sujet – moyenne de la tranche d'âge considérée) ÷ écart-type de la tranche d'âge considérée] afin de situer un sujet vis-à-vis de la norme.

7.2 Limites

Une des limites de ce travail réside dans le nombre relativement réduit de sujets constituant les tranches d'âge 13 et 14 ans. Néanmoins, le nombre de sujets restreint ne semble pas problématique en tant que tel. En effet, des différences statistiquement significatives sont observées entre ces tranches d'âges et les autres, avec des mesures de dispersion (écart-type) qui sont soit comparables entre 10-11-12 ans et 13 ans, soit plus homogènes (notamment pour les 14 ans comparativement à d'autres tranches d'âges). Ceci est compatible avec les données de la littérature qui montrent une amélioration des performances et un resserrement de la variabilité qui s'accroissent avec l'âge (*e.g.*, Spruijt *et al.*, 2015). La fiabilité des résultats obtenus ne paraît donc pas compromise de manière fondamentale. Par ailleurs, concernant l'étude de fidélité test-retest, il serait pertinent d'inclure plus d'enfants d'âges différents afin d'affiner les résultats à ce niveau. Enfin, des travaux supplémentaires s'avèreraient nécessaires pour valider d'autres dimensions du TIMI-2, notamment au sein de diverses populations pathologiques (*e.g.*, patients avec paralysies cérébrales, sujets avec troubles du spectre de l'autisme sans déficit intellectuel, etc.).

8 Conclusions

Tout comme le TIMI-1 avant lui (Puyjarinet *et al.*, 2020), et plus récemment le QUIMOT (Puyjarinet *et al.*, 2023), le TIMI-2 vient combler un manque d'outils d'évaluation ciblant les capacités d'IM, et plus précisément les capacités d'IM implicite. Le TIMI-2 s'adresse à des enfants âgés de 7 ans 0 mois à 14 ans et 11 mois, et sera particulièrement pertinent à utiliser chez des sujets porteurs ou suspectés de TDC. En cas de mise en évidence d'un déficit d'IM implicite, il permettra aux cliniciens de déclencher éventuellement une prise en charge prioritairement basée sur l'utilisation de l'IM en tant que technique de soin (*e.g.*, Scott *et al.*, 2021 ; Wilson *et al.*, 2016). Doté d'excellentes propriétés psychométriques, le TIMI-2 pourra être facilement utilisé au cours d'un bilan psychomoteur, neuropsychologique ou de kinésithérapie notamment, à la faveur de sa rapidité d'administration (6 à 10 minutes). Il est à noter que l'évaluation fine des capacités d'IM dans leurs différentes dimensions impose d'utiliser plusieurs outils (*e.g.*, tests de capacités d'IM explicite). À ce titre, les démarches de conception et de validation d'autres outils d'évaluation des capacités d'IM doivent être poursuivies au sein de populations développementales et adultes françaises (Expertise INSERM, 2019).

Certaines conditions sont requises pour une utilisation adéquate du TIMI-2, comme le fait de bénéficier d'une excellente connexion internet, et de désactiver les notifications du smartphone ou de la tablette qui héberge le test. L'utilisation du test sera pertinente dans des études expérimentales en lien avec le domaine de l'IM chez l'enfant. D'un point de vue clinique, la conception et la mise à disposition gratuite du TIMI-2 s'inscrivent dans une volonté plus large associée au fait de poursuivre les démarches d'étalonnage de tests psychomoteurs. Ce processus contribue à maintenir vivante l'activité de recherche en psychomotricité, et à actualiser le plus régulièrement possible l'arsenal évaluatif des cliniciens, en s'appuyant sur les nouvelles technologies, à l'instar du travail proposé par d'autres équipes (*ex.* : Thorsson *et al.*, 2023).

Remerciements

Les auteurs remercient très chaleureusement les personnes ayant participé à l'étalonnage du TIMI-2 ou aux procédures de validation auprès des enfants, et sans qui les normes correspondantes n'auraient pas pu être publiées : Julie Brémont, Agathe Cantaloube, Pauline Clair, Alyson Coquatrix, Delphine Farenc, Juliette Girardeau, Elodie Grisoni, Mathilde Humbey, Fanny Kappler, Clothilde Le Galle, Mélanie Navarro, Coralie Saint-Ubéry et Sophie Suinot.

Financement

Ce travail a été réalisé avec le soutien financier de la Fondation pour la Recherche en Psychomotricité et Maladie de Civilisation.

Déclaration de disponibilité des données

Le TIMI-2 est disponible gratuitement pour un fonctionnement sur smartphones et tablettes tactiles. Les professionnels désireux d'utiliser le test sont invités à envoyer un mail au premier auteur (f.puyjarinet@hotmail.fr), qui transmettra un lien permanent pour une utilisation sur un nombre illimité de participants.

Références

- Adams, I.L., Lust, J.M., Wilson, P.H., & Steenberg, B. (2014). Compromised motor control in children with DCD: A deficit in the internal model? – A systematic review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *47*, 225–244.
- American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders: DSM-5*. Washington, D.C. : Author.
- Barhoun, P., Fuelscher, I., Kothe, E.J., He, J.L., Youssef, G.J., Enticott, P.G., Williams, J., & Hyde, C. (2019). Motor imagery in children with DCD: A systematic and meta-analytic review of hand-rotation task performance. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *99*, 282–297.
- Barhoun, P., Fuelscher, I., Do, M., He, J.L., Bekkali, S., Cerins, A., Youssef, G.J., Williams, J., Enticott, P.G., & Hyde, C. (2021). Mental rotation performance in young adults with and without developmental coordination disorder. *Human Movement Science*, *77*, 102787.
- Béguet, M., & Albaret, J.M. (1998). Étalonnage du Purdue Pegboard sur une population d'enfants de 6 à 10 ans. *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant*, *10*(1), 19–25.
- Bernaudo, J.-L. (2007). *Introduction à la psychométrie*. Paris : Dunod.
- Blanca, M.J., Alarcón, R., Arnau, J., Bono, R., & Bendayan, R. (2017). Non-normal data: Is ANOVA still a valid option? *Psicothema*, *29*(4), 552–557.
- Blank, R., Barnett, A., Cairney, J., Green, D., Kirby, A., Polatajko, H., Rosenblum, S., Smits-Engelsman, B., Sugden, D., Wilson, P., Vinçon, S. (2019). International clinical practice recommendations on the definition, diagnosis, assessment, intervention, and psychosocial aspects of developmental coordination disorder. *Developmental Medicine & Child Neurology*, *61*(3), 242–285.
- Broc, G., Carlsberg, M., Cazauvieilh, C., Faury, S., & Loyal, D. (2016). *Stats faciles avec R : guide pratique*. Louvain-La-Neuve, B : De Boeck Supérieur.
- Caeyenberghs, K., Wilson, P.H., Van Roon, D., Swinnen, S.P., & Smits-Engelsman, B.C. (2009). Increasing convergence between imagined and executed movement across development: Evidence for the emergence of movement representations. *Developmental Science*, *12*(3), 474–483.
- Cicchetti, D.V. (1994). Guidelines, criteria, and rules of thumb for evaluating normed and standardized assessment instruments in psychology. *Psychological Assessment*, *6*(4), 284.
- Cooper, L.A., & Shepard, R.N. (1975). Mental transformation in the identification of left and right hands. *Journal of Experimental psychology: Human Perception and Performance*, *10*(1), 48–56.

- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*, 2nd ed. Hillsdale, NJ : Erlbaum.
- Corraze, J. (1999). *Les troubles psychomoteurs*. Marseille : Solal.
- Expertise Collective INSERM. (2019). *Trouble développemental de la coordination ou dyspraxie*. Paris : Les Éditions EDP Sciences.
- Fournier, M., & Albaret, J.-M. (2013). Étalonnage des blocs de Corsi sur une population d'enfants scolarisés du CP à la 6ème. *Développements*, 3, 76–82.
- García Carrasco, D., & Aboitiz Cantalapiedra, J. (2016). Effectiveness of motor imagery or mental practice in functional recovery after stroke: A systematic review. *Neurología (English Edition)*, 31(1), 43–52.
- Guillot, A., Hoyek, N., Louis, M., & Collet, C. (2012). Understanding the timing of motor imagery: Recent findings and future directions. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 5(1), 3–22.
- Guillot, A., Collet, C., Nguyen, V.A., Malouin, F., Richards, C., & Doyon, J. (2008). Functional neuroanatomical networks associated with expertise in motor imagery. *Neuroimage*, 41(4), 1471–1483.
- Hankins, M. (2007). Questionnaire discrimination: (Re)-introducing coefficient δ . *BMC Medical Research Methodology*, 7, 19.
- Hankins, M. (2008). Discrimination and reliability: Equal partners? Understanding the role of discriminative instruments in HRQoL research: Can Ferguson's Delta help? A response. *Health and Quality of Life Outcomes*, 6, 83.
- JASP TEAM. (2016). *JASP, Version 0.9.2.0*. <https://jasp-stats.org>.
- Laveault, D., & Grégoire, J. (2023). *Introduction aux théories des tests en psychologie et en sciences de l'éducation*, 4e éd. Louvain-la-Neuve : De Boeck Supérieur.
- Lebon, F., Byblow, W.D., Collet, C., Guillot, A., & Stinear, C.M. (2012). The modulation of motor cortex excitability during motor imagery depends on imagery quality. *European Journal of Neuroscience*, 35(2), 323–331.
- Lebon, F., Lotze, M., Stinear, C.M., & Byblow, W.D. (2012). Task-dependent interaction between parietal and contralateral primary motor cortex during explicit versus implicit motor imagery. *PLoS One*, 7(5), e37850.
- López, N.D., Monge Pereira, E., Centeno, E.J., & Miangolarra Page, J.C. (2019). Motor imagery as a complementary technique for functional recovery after stroke: A systematic review. *Topics in Stroke Rehabilitation*, 26(8), 576–587.
- Lotze, M., & Halsband, U. (2006). Motor imagery. *Journal of Physiology*, 99(4-6), 386–395.
- Marquet Doléac, J., Soppelsa, R., & Albaret, J.-M. (2016). *MABC-2: batterie d'évaluation du mouvement chez l'enfant – 2e édition (MABC-2) – adaptation française*. Montreuil : Pearson.
- Monany, D.R., Papaxanthis, C., Guillot, A., & Lebon, F. (2022). Motor imagery and action observation following immobilization-induced hypoactivity: A narrative review. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 65(4), 101541.
- Morone, G., Ghanbari Ghooshchy, S., Pulcini, C., Spangu, E., Zoccolotti, P., Martelli, M., Spitoni, G.F., Russo, V., Ciancarelli, I., Paolucci, S., & Iosa, M. (2022). Motor Imagery and Sport Performance: A Systematic Review on the PETTLEP Model. *Applied Sciences*, 12(19), 9753. doi: [0.3390/app12199753](https://doi.org/10.3390/app12199753).
- Parsons, L.M. (1994). Temporal and kinematic properties of motor behavior reflected in mentally simulated action. *Journal of Experimental Psychology, Human Perception and Performance*, 20, 709–730.
- Puyjarinet, F. (2019). Intérêts de la pratique de l'imagerie motrice dans la rééducation de l'écriture des enfants dysgraphiques. *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant*, 159, 257–267.
- Puyjarinet, F., Soppelsa, R., & Connan, J.-F. (2020). Le test d'imagerie motrice implicite (TIMI-1): standardisation et étalonnage chez des enfants de 7 à 11 ans. *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant*, 167, 480–494.
- Puyjarinet, F., Madramany, P., Autexier, A., Madieu, M., Nesensohn, J., & Biotteau, M. (2022). Psychomotor intervention to improve handwriting skills in children with ADHD: A single-case experimental design with direct inter-subject and systematic replications. *Neuropsychological Rehabilitation*, 33(9), 1537–1563. doi: [10.1080/09602011.2022.2114503](https://doi.org/10.1080/09602011.2022.2114503).
- Puyjarinet, F., Connan, J.-F., Maury, L., & Soppelsa, R. (2023). Étalonnage et validation d'un questionnaire d'évaluation des capacités d'imagerie motrice sur une population développementale: le QUIMOT. *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant*, 183, 215–228.
- R Core Team. (2023). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna (Austria) : R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>.
- Reed, J., & Warner-Rogers, J. (2008). *Child Neuropsychology: Concept, Theory and Practice*. Oxford : Wiley-Blackwell.
- Robin, N., & Dominique, L. (2022). Mental imagery and tennis: A review, applied recommendations and new research directions. *Movement & Sport Sciences-Science & Motricité*, online ahead of print.
- Ruffino, C., Papaxanthis, C., & Lebon, F. (2017). Neural plasticity during motor learning with motor imagery practice: Review and perspectives. *Neuroscience*, 341, 61–78.
- Schmider, E., Ziegler, M., Danay, E., Beyer, L., & Bühner, M. (2010). Is it really robust? Reinvestigating the robustness of ANOVA against violations of the normal distribution assumption. *Methodology: European Journal of Research Methods for the Behavioral and Social Sciences*, 6(4), 147–151. doi: [10.1027/1614-2241/a000016](https://doi.org/10.1027/1614-2241/a000016).
- Scott, M.W., Wood, G., Holmes, P.S., Williams, J., Marshall, B., & Wright, D.J. (2021). Combined action observation and motor imagery: An intervention to combat the neural and behavioural deficits associated with developmental coordination disorder. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 127, 638–646.
- Shenton, J.T., Schwoebel, J., & Coslett, H.B. (2004). Mental motor imagery and the body schema: Evidence for proprioceptive dominance. *Neuroscience Letters*, 370(1), 19–24.
- Shepard, R.N., & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Science*, 171(3972), 701–703.
- Shrout, P.E. (1998). Measurement reliability and agreement in psychiatry. *Statistical Methods in Medical Research*, 7(3), 301–317.
- Sirigu, A., & Duhamel, J.R. (2001). Motor and visual imagery as two complementary but neurally dissociable mental processes. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13(7), 910–919.

- Smits-Engelsman, B.C., & Wilson, P.H. (2013). Noise, variability and motor performance in developmental coordination disorder. *Developmental Medicine & Child Neurology* 2013, 55(Suppl. 4), 69–72.
- Spruijt, S., van der Kamp, J., & Steenbergen, B. (2015). Current insights in the development of children's motor imagery ability. *Frontiers in Psychology*, 6, 787.
- 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.
- Thorsson, M., Galazka, M.A., Hajjari, P., Fernell, E., Delafield-Butt, J., Gillberg, C., Johnson, M., Åsberg Johnels, J., & Hadjikhani, N. (2023). A novel tablet-based motor coordination test performs on par with the Beery VMI subtest and offers superior temporal metrics: Findings from children with pediatric acute-onset neuropsychiatric syndrome. *Experimental Brain Research*, 241(5), 1421–1436.
- Williams, J., Thomas, P.R., Maruff, P., & Wilson, P.H. (2008). The link between motor impairment level and motor imagery ability in children with developmental coordination disorder. *Human Movement Science*, 27(2), 270–285.
- Wilson, P.H., Adams, I.L., Caeyenberghs, K., Thomas, P., Smits-Engelsman, B., & Steenbergen, B. (2016). Motor imagery training enhances motor skill in children with DCD: A replication study. *Research in Developmental Disabilities*, 57, 54–62.

Citation de l'article : Puyjarinet F, Connan J-F, Nesensohn J, Soppelsa R, & Seilles A (2025) Étalonnage du Test d'Imagerie Motrice Implicite 2^e version sur une population développementale française : le TIMI-2. *Mov Sport Sci/Sci Mot*, <https://doi.org/10.1051/sm/2024027>

Annexes**TIMI 2 : Test d'Imagerie Motrice Implicite 2^{nde} version**

Auteurs : Frédéric Puyjarinet, Jean-François Connan, Jessica Nesensohn, Régis Soppelsa, Antoine Seilles

NOM :	Date de l'évaluation :/...../.....
PRÉNOM :	Score Total : Quartile :
Date de naissance :/...../.....	Temps de Réponse Moyen : Quartile* :
Âge :	
Latéralité :	Performance globale (DS) :

* Pour le Temps de Réponse Moyen seulement : le Quartile 3 constitue le seuil considéré comme problématique.

Tableau 1 Résultats pour le Score Total en fonction de l'âge.

Tranches d'âge	Score Total					
	7 ans	8 ans	9 ans	10-11-12 ans	13 ans	14 ans
Moyenne	33,06	37,26	40,17	41,00	41,75	43,14
Médiane	33,00	40,00	42,00	43,00	43,00	43,00
Écart-type	8,01	8,51	6,46	6,63	5,33	3,72
Erreur standard de la moyenne	0,70	0,77	0,56	0,43	0,83	0,71
Minimum	18,00	14,00	20,00	19,00	25,00	32,00
Maximum	48,00	48,00	48,00	48,00	48,00	48,00
Quartile 1	25,25	30,25	37,00	37,75	41,00	41,50
Quartile 3	40,00	44,00	45,00	46,00	45,00	46,00

Tableau 2 Résultats pour le Temps de Réponse Moyen en fonction de l'âge.

Tranches d'âge	Temps de Réponse Moyen (s)					
	7 ans	8 ans	9 ans	10-11-12 ans	13 ans	14 ans
Moyenne	4,71	4,22	4,00	3,35	2,67	2,13
Médiane	4,41	4,07	3,71	3,24	2,47	2,05
Écart-type	1,68	1,64	1,31	1,05	0,87	0,47
Erreur standard de la moyenne	0,14	0,14	0,11	0,06	0,13	0,09
Minimum	1,22	1,89	2,12	1,21	1,39	1,24
Maximum	9,61	9,58	8,16	8,17	5,43	3,07
Quartile 1	3,60	3,22	2,97	2,53	2,03	1,79
Quartile 3	5,42	5,40	4,68	3,97	3,25	2,32

Tableau 3 Résultats pour la Performance Globale en fonction de l'âge.

Tranches d'âge	Performance Globale					
	7 ans	8 ans	9 ans	10-11-12 ans	13 ans	14 ans
Moyenne	63,77	78,01	89,36	104,09	125,75	148,00
Médiane	62,00	77,00	84,00	102,00	127,00	147,00
Écart-type	19,34	27,14	27,28	28,01	30,15	17,96
Erreur standard de la moyenne	1,69	2,45	2,39	1,82	4,71	3,45
Minimum	24,00	26,00	35,00	43,00	73,00	100,00
Maximum	118,00	150,00	152,00	175,00	179,00	179,00
Quartile 1	51,00	56,25	69,00	85,00	99,00	138,50
Quartile 3	74,00	94,75	111,75	123,00	152,00	159,50

Observations durant la passation :**Le sujet a-t-il utilisé une stratégie de résolution basée sur l'imagerie motrice ? OUI – NON**

* Si non : ne pas interpréter les résultats de l'enfant sur la base des normes du TIMI-2.