

---

# 9

## Contrôle sensorimoteur

Les enfants présentant un TDC constituent un groupe hétérogène qui présente des difficultés communes dans l'apprentissage et l'utilisation d'habiletés motrices, en dépit d'un niveau intellectuel préservé et de l'absence de troubles sensoriels ou moteurs primaires. Ce trouble des apprentissages moteurs entraîne des répercussions directes et indirectes non négligeables sur la qualité de vie quotidienne qui peuvent persister jusqu'à l'âge adulte (Rasmussen et Gillberg, 2000 ; Biancotto et coll., 2011). Même si l'étiologie du TDC ne fait pas encore l'objet d'un consensus, le fait que ce trouble soit dû à des facteurs intrinsèques à l'enfant met l'accent sur l'origine neurobiologique de ce trouble.

Le champ du contrôle moteur a exploré depuis plus de vingt ans ce trouble spécifique de la motricité, sans se soucier le plus souvent, de l'existence possible d'autres désordres sortant de son domaine d'exploration. Au fil des années, la MABC associée ou non à d'autres tests cognitivo-moteurs a largement contribué à rendre la population porteuse de TDC plus comparable dans la littérature internationale. Néanmoins, des études récentes commencent à distinguer la présence ou non de comorbidité dans les groupes d'enfants présentant un TDC, ce qui conduit à nuancer certains résultats précédemment établis (Smits-Engelman et coll., 2015 ; Jelsma et coll., 2016 ; Cignetti et coll., 2018). En effet, rappelons qu'une caractéristique de cette pathologie développementale est qu'elle est souvent accompagnée d'autres difficultés d'apprentissage qui touchent aussi bien la sphère de l'attention, que la sphère de la lecture et/ou de l'écriture et bien d'autres (Clark et Whitall, 2011 ; Zwicker et coll., 2012 ; Vaivre-Douret, 2014), soulevant ainsi la question pertinente d'une étiologie commune ou dissociée (Biotteau et coll., 2015). Certainement en lien avec la nature du MABC, les grandes fonctions motrices comme la posture, la locomotion et les habiletés bimanuelles ont été méthodiquement étudiées chez les enfants présentant un TDC permettant ainsi, depuis la fin des années 90, d'engranger de multiples différences en comparaison de leurs pairs au développement typique. Parallèlement à cette approche descriptive quantifiée, qui constitue un socle préalable indispensable, les années 2000 ont davantage cherché une inspiration dans les

concepts du contrôle moteur, de la théorie des systèmes dynamiques et des neurosciences pour établir des modèles explicatifs du TDC, depuis le couplage perception-action, l'approche dynamique de la coordination, jusqu'à la cognition motrice avec la théorie des représentations internes de l'action.

## **Variabilité et ralentissement accompagnent les performances motrices des enfants porteurs d'un TDC**

Une majorité de travaux dédiés au TDC, explorant diverses tâches sensori-motrices de laboratoire ou de la vie quotidienne, rapporte une variabilité intra et interindividuelle excessive qui accompagne les paramètres moteurs et locomoteurs, des enfants présentant un TDC, tels que la vitesse, la précision, la stabilisation (Smits-Engelsman et coll., 2008 et 2013 ; Rosengren et coll., 2009 ; Chia et coll., 2013 ; Licari et Reynolds, 2017 ; Wilmot et coll., 2017), conduisant ainsi certains chercheurs à proposer un indice de variabilité qui caractérise cette augmentation en lien avec les déficits comportementaux individuels (King et coll., 2011 et 2012). La notion de bruit neuromoteur a également été évoquée pour rendre compte de la variabilité excessive qui caractérise la motricité des enfants porteurs d'un TDC (Smits-Engelsman et Wilson, 2013). D'après ces auteurs, le bruit neuromoteur se conçoit à tous les stades du contrôle sensorimoteur depuis les récepteurs sensoriels, la planification centrale du mouvement jusqu'aux activations musculaires et sorties motrices. À ce propos, une étude récente confirme la faible capacité anaérobie des enfants présentant un TDC lors de tests de puissance musculaire (Aertssen et coll., 2016). Ce bruit excessif contaminerait les processus de planification du geste, engendrant une incertitude quant à la précision du mouvement final, ce qui rendrait les prédictions sur le corps en mouvement plus difficiles, et affecterait ainsi le contrôle prédictif. Dans une récente revue de questions, Licari et Reynolds (2017) s'interrogent plus largement sur les facteurs responsables de cette variabilité dans le TDC et mettent en avant la variabilité des aires cérébrales impactées selon les études, de même que la contribution génétique.

Une seconde constante qui ressort fortement de la littérature est un déficit de l'organisation temporelle de la coordination entre les différents segments corporels engagés dans le mouvement. Ce déficit dans le réglage temporel, souvent au profit d'un ralentissement, affecte les performances motrices et perceptivo-motrices (Geuze et Kalverboer, 1987 et 1994 ; Van Waelvelde et coll., 2005 ; Diamond et coll., 2014 ; Caçola et coll., 2016 ; Gentle et coll., 2016). Il est à noter que le ralentissement constitue, dans le développement cognitivo-moteur typique, la première stratégie adaptative en réponse à

l'augmentation de la difficulté à surmonter (Assaiante et Amblard, 1995). La maîtrise des paramètres temporels (vitesse, durée, latences, etc.) est particulièrement longue à se mettre en place au cours de l'enfance et de l'adolescence et elle est souvent décrite comme vulnérable dans le cas de pathologies développementales ou survenant chez l'adulte (Assaiante, 2012 ; Assaiante et Amblard, 1995 ; Assaiante et coll., 2005). Dans le cas du TDC, ce déficit des paramètres temporels affecte aussi bien le contrôle de l'équilibre que les coordinations intersegmentaires.

### **Contrôle de l'équilibre, tâches de saisie et de coordination : la triade initiale des déficits**

En situation de posture statique normale et familière, le contrôle de l'équilibre ne constitue pas un problème pour la majorité des enfants présentant un TDC (Geuze, 2003 et 2005 ; Tsai et coll., 2008). En revanche, en situation rendue difficile soit par la réduction de la surface d'appui, soit par une suppression sensorielle, la vision le plus souvent, le contrôle de l'équilibre se trouve affecté. Des séquences d'activation musculaire temporellement inadaptées, des co-contractions des muscles antagonistes (Raynor, 2001) et des décharges musculaires moins puissantes constituent les caractéristiques d'un contrôle postural déficient rencontré chez les enfants porteurs d'un TDC (Geuze, 2005 ; Fong et coll., 2013 et 2015).

En effet, un contrôle postural efficace est assuré par l'intégration des différentes informations sensorielles disponibles. La sélection et la repondération sensorielles opèrent en fonction du contexte et de la période développementale de chaque individu. Ainsi, l'enfant et l'adolescent comme l'adulte utilisent les informations visuelles, vestibulaires et proprioceptives au service du contrôle postural, mais leurs contributions respectives varient au cours de l'ontogenèse (Assaiante et Amblard, 1995). À partir de 7-8 ans, l'enfant au développement typique est capable de commencer à pondérer ses entrées sensorielles en fonction du contexte, par exemple à donner plus de poids aux informations en provenance du support sur lequel il se tient en l'absence de vision (Assaiante, 2012 ; Assaiante et coll., 2005). Chez les enfants présentant un TDC, plusieurs études rapportent un déficit de l'organisation sensorielle du contrôle de l'équilibre en situation difficile avec une moins bonne utilisation des informations vestibulaires (Grove et Lazarus, 2007) et proprioceptives (Fong et coll., 2011 et 2012) au profit des informations visuelles (Deconinck et coll., 2008). Il est possible, toutefois, d'améliorer l'utilisation de la modalité proprioceptive au profit de l'équilibre, soit par un entraînement somatosensoriel spécifique, tel que le programme

d'entraînement de mouvement fonctionnel autour de l'équilibre (FMT), à raison de deux séances par semaine pendant trois mois (Fong et coll., 2016), soit par un contact léger du doigt sur un support permettant d'établir un appui (Bair et coll., 2011 ; Chen et Tsai, 2016). Par ailleurs, une augmentation de la dépendance visuelle pour le contrôle locomoteur a été signalée, comme le montre la dégradation massive du contrôle postural en l'absence de vision (Deconinck et coll., 2006). Néanmoins cette prédominance de la vision au service du contrôle postural n'est pas retrouvée dans toutes les études (Geuze, 2005 ; Tsai et coll., 2008), certainement en raison de différences dans la manipulation du flux visuel. Dans tous les cas, ces études illustrent bien le déficit de repondération sensorielle ainsi qu'une insuffisance de fusion multisensorielle (intégration en un percept unique de l'ensemble des signaux sensoriels) qui touchent cette pathologie dans la réalisation de tâches posturales complexes (Cherng et coll., 2007 ; Bair et coll., 2012).

Dans la vie quotidienne, le contrôle postural a rarement pour vocation d'être statique. En situation dynamique, il permet l'expression d'une motricité harmonieuse et efficace, en assurant l'équilibre lors de l'initiation et au cours de la réalisation d'une action ou de multiples actions simultanées. Des difficultés d'équilibre sont plus fréquemment rapportées chez les enfants présentant un TDC, tant en conditions dynamiques qu'en conditions statiques, notamment lors de l'enjambement d'obstacles (Deconinck et coll., 2010), et lors de la course (Chia et coll., 2013 ; Diamond et coll., 2014). Les doubles tâches, en augmentant le coût attentionnel, augmentent aussi davantage les difficultés d'équilibre locomoteur chez les enfants présentant un TDC comparés à leurs pairs (Cherng et coll., 2009). L'ajout d'une tâche cognitive concurrente à la tâche posturale détériore le contrôle de l'équilibre des enfants porteurs d'un TDC qui semblent prioriser la tâche cognitive (Laufer et coll., 2008 ; Chen et coll., 2011 ; Schott et coll., 2016). Ces résultats sont interprétés comme un déficit d'automatisation du contrôle de l'équilibre, dès lors qu'une autre tâche requiert des ressources attentionnelles. Enfin, il convient de rapporter également une étude récente (Fong et coll., 2016) qui souligne le déficit attentionnel des enfants présentant un TDC engagés dans des tâches motrices, ce qui expliquerait, en partie, la détérioration des performances motrices par un manque d'attention, qui n'est pas suffisamment examiné, dans la pratique clinique, comme trouble associé éventuel.

La variabilité d'activation neuromusculaire, les problèmes de réglage temporel, de force musculaire inadéquate et de pondération des informations sensorielles, évoqués ci-dessus dans le contrôle postural affectent également les performances recueillis dans des tâches de pointage (Wilmot et coll., 2006 ; Elders et coll., 2010), de saisie et de rattrapage d'objet en mouvement

(Peireira et coll., 2001 ; Van Waelvelde et coll., 2004 ; Astill et Utley, 2008). Les déficits neuromusculaires, responsables du ralentissement sont également rapportés lors de tâches de saisie (Biancotto et coll., 2011). Néanmoins le contrôle de saisie chez les enfants présentant un TDC reste modulable en fonction des caractéristiques de l'objet à soulever (Law et coll., 2010), même si leur saisie est caractérisée par une force excessive qui résulte d'une marge de sécurité élevée (Pereira et coll., 2001). Il est à noter que les enfants porteurs d'un TDC qui présentent également des troubles de l'attention n'ont pas de déficits supplémentaires dans des tâches de saisie de précision (Pereira et coll., 2001). Ainsi, il semblerait que les caractéristiques des objets à saisir soient correctement représentées alors que les prédictions du geste de saisie soient plus approximatives.

Le rattrapage d'objet en mouvement, le plus souvent une balle, requiert que les mains soient posées sur l'objet à la bonne place et au bon moment. La force et la maîtrise temporelle des effecteurs en action nécessitent d'être ajustée à la vitesse, la direction, le poids et la taille de l'objet à réceptionner (Van Waelvelde et coll., 2004). Cette habileté perceptivo-motrice peut être interprétée comme un parfait exemple de couplage perception-action et d'anticipation sur la base d'une représentation sensorimotrice. Le rattrapage de balle est inclus dans la plupart des tests destinés à évaluer les déficits visuels perceptifs associés aux déficits moteurs. Les stratégies cinématiques de rattrapage de balle adoptées par les enfants présentant un TDC ne sont pas simplement des stratégies immatures d'enfants plus jeunes au développement typique, elles sont véritablement atypiques et produisent souvent des résultats inférieurs (Van Waelvelde et coll., 2004 ; Astill, 2007 ; Mak, 2010). Certains auteurs évoquent un défaut de préparation motrice, particulièrement marqué lorsque le mouvement est complexe (Mon-Williams et coll., 2005). En fait les enfants porteurs d'un TDC n'exploiteraient pas aussi efficacement que leurs pairs, les informations présentes dans l'environnement de la tâche pour optimiser leur saisie.

Il ressort donc de la littérature que les déficits premiers et incontournables du TDC concernent le contrôle de l'équilibre, les tâches de coordination et la capacité à intégrer et à pondérer les différentes modalités sensorielles.

## **Les troubles de la coordination sensorimotrice : apport de la théorie dynamique**

Le TDC, comme son nom l'indique, se manifeste par un déficit de coordination. La théorie des systèmes dynamiques suggère que la coordination est

une propriété émergente, auto-organisée du système perceptivo-moteur, nourrie à la fois de l'interaction entre ses composantes et de l'effet de contraintes globales qui s'exercent sur lui. Dans l'approche motrice classique, les différents éléments du système effecteur exécutent les instructions en provenance du système nerveux central. Le contrôle des mouvements se fait donc de façon prescriptive : les ordres moteurs sont émis par le système nerveux central en direction des effecteurs. Selon l'approche dynamique, la coordination est considérée comme un problème d'auto-organisation, où le mouvement produit n'est pas la conséquence directe, d'une instruction externe. Les composants du système coopèrent et agissent en interaction afin de réaliser un but commun. Les travaux pionniers de Kelso (1984) ont apporté la première preuve expérimentale d'auto-organisation dans le domaine de la motricité à partir de tâches de coordination bimanuelle. Cette théorie met l'accent sur la dynamique propre du système qui favorise des états stables, la façon de les obtenir, grâce à des attracteurs (ou coordinations préférentielles), et de les maintenir en fonction des contraintes imposées au système.

Selon cette théorie, il existe des coordinations préférentielles entre deux membres ou entre un membre et un stimulus. Il s'agit de la coordination « en phase », pour laquelle les membres sont activés de manière synchrone entre eux ou avec un stimulus, et de la coordination « en antiphase » pour laquelle les membres sont activés en alternance entre eux ou avec un stimulus. Chez l'individu typique, la coordination en phase est plus stable que la coordination en antiphase, comme en témoigne une déstabilisation de la coordination en antiphase lorsqu'on impose d'augmenter la fréquence de mouvement, au profit d'un passage vers la coordination en phase (Kelso, 1984). Chez les enfants présentant un TDC, les résultats expérimentaux montrent que la coordination en antiphase est particulièrement instable lorsque les contraintes augmentent (fréquence de mouvement), que la tâche soit bimanuelle (Volman et Geuze, 1998 ; Volman et coll., 2006) ou qu'il s'agisse d'une synchronisation audio-motrice (Whitall et coll., 2006 et 2008 ; De Castelnaud et coll. 2008 ; Roche et coll., 2011).

En utilisant ce modèle théorique pour caractériser la coordination sensori-motrice des enfants porteurs d'un TDC, Volman et Geuze (1998) ont conclu que la présence d'attracteurs moins puissants pouvait être responsable de l'instabilité des patrons moteurs, maintes fois décrite dans la littérature (MacKenzie et coll., 2008). De nombreux papiers inspirés par cette approche dynamique ont rapporté une coordination intersegmentaire altérée en raison d'une organisation spatiale et temporelle déficiente, s'agissant de tâches bimanuelles (Astill et Utley, 2006 ; Przysucha et Maraj, 2013 et 2014) ou

de tâches impliquant le couple main-pied (Volman et coll., 2006). D'autres études ont davantage mis en avant des troubles de la synchronisation du mouvement d'une main (*tapping*) avec un métronome (De Castelnau et coll., 2007 ; Mackenzie et coll., 2008 ; De Castro Ferracioli et coll., 2014). Malgré une grande hétérogénéité dans les résultats d'enfants présentant un TDC, ces résultats suggèrent à nouveau des troubles de l'organisation temporelle du mouvement largement évoqués dans l'ensemble de la littérature.

Enfin, d'autres études indiquent que les enfants porteurs d'un TDC présentent une tendance à produire des mouvements miroirs avec les deux mains (en phase) lorsqu'une tâche uni-manuelle leur est demandée (Licari et coll., 2006 ; Licari et Larkin, 2008 ; Tallet et coll., 2013 ; Licari et coll., 2015 ; Blais et coll., 2018). La présence de mouvements miroirs, aussi appelées synchronies contralatérales en français, pourrait également expliquer en partie les troubles de coordination motrices des enfants porteurs d'un TDC, lors de tâches uni-manuelles ou bimanuelles complexes. En effet, les mouvements miroirs (coordination symétrique / en phase) correspondraient à un attracteur entravant la production d'autres coordinations asymétriques (Blais et coll., 2018).

## **D'une exploration du système visuel à un désordre visuo-spatial : une piste qui fait débat**

En dépit d'un trouble évident de la repondération sensorielle, évoqué précédemment, la possibilité d'une atteinte directe de la perception des différentes modalités impliquées dans le contrôle sensorimoteur reste une question posée dans la littérature. Dès 1998, Wilson et McKenzie défendent l'idée que le déficit le plus marquant des enfants présentant un TDC est d'ordre visuo-spatial et qu'il s'avère donc indispensable d'explorer également les éventuels déficits perceptifs de ces enfants (voir chapitre « Cognition »). L'importance du rôle joué par la vision dans le développement moteur, appelle naturellement une exploration détaillée du système visuel (Gibson et Walk, 1960 ; Lee et Aronson, 1974 ; Assaiante et Amblard, 1995 ; Chokron et Dutton, 2016).

Le développement oculomoteur constitue une voie d'accès privilégiée pour explorer le développement du contrôle sensorimoteur et des fonctions exécutives comme l'inhibition ou la prise de décision ainsi que l'intégrité des structures cérébrales sous-jacentes (Katschmarsky et coll., 2001 ; Grinter et coll., 2010 ; Sumner et coll., 2016 ; Gaymard et coll., 2017). Ainsi, il apparaît que la durée des poursuites oculaires et les performances d'antisaccade,

qui mesurent l'inhibition, constituent des indicateurs fiables qui permettent de distinguer les enfants présentant un TDC de leurs pairs (Sumner et coll., 2016). Diverses tâches de saccades oculaires ont rapporté des particularités chez les enfants présentant un TDC, notamment l'augmentation de la variabilité, de l'imprécision et des défauts de réglage temporel, comme le profil de vitesse maximale diminué au profit de phases prolongées de décélération ; autant d'anomalies qui pourraient refléter un dysfonctionnement du cervelet et des connections fronto-cérébelleuses (Gaymard et coll., 2017). Les mêmes interprétations sont proposées pour les déficits de poursuites horizontale et verticale chez les enfants présentant un TDC (Robert et coll., 2014). Les enfants porteurs d'un TDC présentent également des problèmes d'inhibition saccadique et de maintien d'attention sur une cible visuelle (Sumner et coll., 2016). Ces résultats corroborent d'autres données provenant des approches cognitives sur les déficits perceptifs et les perturbations des fonctions attentionnelles (voir chapitre « Cognition »).

Il convient également de signaler un certain nombre d'anomalies ophtalmiques rapportées chez les enfants porteurs d'un TDC, touchant la vision binoculaire, l'erreur réfractive, l'accommodation et l'alignement oculaire, dont les répercussions peuvent être négatives au niveau de l'apprentissage de la lecture (Creavin et coll., 2013 ; Rafique et Northway, 2015), sans que ces anomalies soient spécifiques du TDC (Vaivre-Douret et coll., 2011). En effet, la plupart de ces études, ne mentionnent pas d'information sur la comorbidité de leurs échantillons, si ce n'est que leurs sujets ne présentent aucun trouble de l'attention ni déficits intellectuels. Il est donc possible que ces études aient inclus des enfants avec une comorbidité entre TDC et dyslexie, ce qui modèrerait leurs conclusions. Ainsi se posent les questions de savoir si ces désordres du système visuel sont inhérents au TDC ou bien s'il s'agit d'une comorbidité intimement liée aux troubles de l'acquisition de l'alphabétisation, de l'attention et de la lecture (Fletcher-Flinn et coll., 1997 ; Crawford et Dewey, 2008). Par ailleurs, la revue de question récente de Chokron et Dutton (2016) nous alerte sur l'existence de déficits visuels cérébraux, notamment chez les prématurés, qui en impactant le développement des habiletés motrices, conduisent à des troubles visuo-spatiaux et visuo-moteurs, proches du TDC.

En dépit de ces interrogations, différents travaux s'accordent sur la présence de troubles visuo-spatiaux chez les enfants porteurs d'un TDC (Tsai et coll., 2008 et 2010 ; Cheng et coll., 2014). Ces mêmes travaux soulignent également l'hétérogénéité des enfants présentant un TDC, suggérant l'existence probable d'un sous-groupe, spécifiquement porteur de ces troubles visuo-spatiaux (Tsai et coll., 2008 ; Chaix et Albaret, 2014). La proposition d'un sous-groupe d'enfants présentant un TDC permet de concilier, dans la

littérature, les résultats contradictoires qui n'indiquent aucun troubles visuo-spatiaux (Schoemaker et coll., 2001).

Selon la définition d'Irani (2011), l'habileté visuo-spatiale constitue une composante de la perception visuelle qui permet le traitement de l'orientation visuelle ou de l'emplacement des objets dans l'espace qui s'appuie sur la voie occipito-pariétale ou dorsale de l'information visuelle. La voie visuelle dorsale présente la particularité d'être impliquée à la fois dans la perception et l'action (Pisella et coll., 2009). Elle contribue au développement fonctionnel du réseau sous-tendant des habiletés visuo-motrices de haut niveau (praxies) et les habiletés visuo-cognitives (Pisella et coll., 2013). L'hypothèse d'un déficit de la voie dorsale chez les enfants porteurs d'un TDC est l'objet de résultats discordants (Grinter et coll., 2010). En 2002, O'Brien et ses collaborateurs rapportent un déficit global spatial, chez les enfants porteurs d'un TDC, non pas sur la voie dorsale mais sur la voie ventrale, occipito-temporale, sur la base d'une épreuve de détection de seuils de cohérence de forme plus élevés chez les enfants présentant un TDC, en comparaison de leurs pairs. Aucune différence de seuil n'a pu être établie sur l'épreuve de cohérence de mouvement. Cependant, ces résultats sont contredits en 2003 par l'étude de Sigmundsson et ses collaborateurs qui montre une atteinte des deux voies dorsale (occipito-pariétale) et ventrale (occipito-temporale) dans des tâches similaires. Le nombre peu élevé de sujets dans ces deux études et l'hétérogénéité des échantillons peuvent aisément expliquer ces résultats discordants, de même que la question des éventuelles comorbidités non renseignée (Chaix et Albaret, 2014). Quoi qu'il en soit, l'hypothèse d'un déficit de la voie dorsale chez les enfants présentant un TDC a été suggérée dans de récentes études (Vaivre-Douret et coll., 2011 et 2012 ; Robert et coll., 2014), et reste une piste prometteuse qu'il convient d'éclaircir, au plus tôt, avec un groupe conséquent et bien identifié d'enfants porteurs d'un TDC. L'utilisation d'un test développemental révélant la lente acquisition de la perception visuo-spatiale et de son substrat cérébral semble être la meilleure option pour répondre à cette question (Pisella et coll., 2013).

## **Le couplage perception-action est altéré dans le TDC**

Une des caractéristiques essentielles de la motricité est d'assurer dès la naissance le dialogue entre l'individu et son environnement. Cette interaction est possible grâce à un couplage précoce qui est réalisé entre l'environnement perçu, aussi bien physique que social, et l'action engagée pour agir sur cet environnement (Gibson et Walk, 1960 ; Lee et Aronson, 1974 ; Meltzoff et Moore, 1977 ; Adolph et coll., 1993).

Chez les enfants présentant un TDC, de nombreuses études ont apporté des preuves expérimentales d'un déficit du couplage perception-action et d'un manque d'adaptabilité lors des situations de transition et/ou de complexification de la tâche (Johnson et Wade, 2007 et 2009 ; Cantin et coll., 2014). L'apprentissage de la conduite automobile sur simulateur, plus long et moins performant, chez les enfants présentant un TDC est un bon exemple de l'atteinte du couplage perception-action, pour lequel l'hypothèse d'un déficit de la voie dorsale est évoquée (Oliveira et Wann, 2011). Les jeunes adultes porteurs d'un TDC ont des difficultés à intégrer les informations visuelles de l'espace proche et de l'espace lointain pour les mouvements de guidage, ce qui suggère que leur intégration est sous-optimale et valide partiellement un déficit cérébelleux (Oliveira et Wann, 2010). Le jugement de vitesse d'approche de véhicules est également altéré, ce qui peut avoir des incidences pour les jeunes piétons porteurs d'un TDC qui apprennent à traverser (Purcell et coll., 2011 et 2012).

Néanmoins il est important de préciser que le couplage perception-action, même s'il n'est pas optimum, est opérant chez les enfants présentant un TDC. La chambre mobile est un dispositif expérimental de conflit sensoriel entre les informations visuelles vestibulaires et proprioceptives, proche du phénomène devection, que l'on peut ressentir dans un train à l'arrêt, lorsqu'un autre train démarre. Ce démarrage induit ainsi une illusion de mouvement par le flux visuel déclenché, en contradiction avec les informations proprioceptives et vestibulaires. La chambre mobile, par son seul flux visuel déclenche une réponse posturale chez les enfants porteurs d'un TDC, à l'instar de leurs pairs, même si les réponses visuo-posturales restent qualitativement différentes (Chung et Stoffregen, 2011). Le jugement perceptif de l'espace nécessaire pour exécuter un mouvement est sous-estimé (Wilmot et coll., 2016). De plus, le fait de moins manipuler les objets entraîne des conséquences sur leur perception, notamment en altérant la perception de la taille (Chen et Wu, 2013 ; Wade et coll., 2015), ce qui illustre parfaitement l'atteinte du couplage perception-action.

Si une altération du couplage perception-action est largement admise chez les enfants présentant un TDC, en revanche deux modèles explicatifs continuent à s'opposer (Wade et Kazeck, 2018). D'une part, la théorie écologique de Gibson (1979) propose que la perception première des objets entraîne la création d'affordances, qui sont définies comme les possibilités d'agir sur un objet. L'étude de Chen et coll. (2014) indique que le jugement perceptif des affordances est moins précis chez les enfants présentant un TDC, comme en témoigne le fait que les oscillations posturales ne sont pas modulées en fonction des variations du flux (Chen et coll., 2014). D'autre part la théorie des

modèles internes (Wolpert et Miall, 1996 ; Wolpert et coll., 1998), qui sera détaillée plus loin, propose que les représentations sensorimotrices sont indispensables à une motricité adaptée à son environnement.

Une troisième proposition, qui a le mérite de concilier ces deux approches, serait que le couplage perception-action précoce, sous-tendu par le système miroir, qui présente la caractéristique d'être activé aussi bien quand le sujet exécute une action que quand il voit la même action être exécutée par un tiers (Rizzolatti et coll., 2001 et 2002), constitue le socle des représentations sensorimotrices (Assaiante et coll., 2014). Dans le cas de cette nouvelle hypothèse, une altération de ce couplage chez les enfants porteurs d'un TDC conduirait également à une altération des représentations internes de l'action et du corps en action.

Des études récentes apportent la preuve que le système miroir est fonctionnel dès la naissance (van Elk et coll., 2008). Des études anciennes préconisaient déjà la présence d'un schéma corporel primitif et fondamental permettant d'unifier dans un système commun les actes visuellement perçus et ceux réalisés dès la naissance (Meltzoff et Moore, 1977, 1983 et 1997). Dans le même esprit, l'imitation néonatale et plus généralement l'imitation de gestes repose également sur les mêmes mécanismes de couplage perception-action, dont les bases neurales correspondent au système des neurones miroir (Blakemore et Frith, 2003 ; Iacoboni et Dapretto, 2006 ; Niedenthal, 2007). Compte tenu de l'importance de l'imitation dans les apprentissages moteurs, un déficit des capacités imitatives des enfants porteurs d'un TDC a été suspecté assez tôt (Ayres, 1989). Ces déficits d'imitation ont été confirmés dans des études plus récentes proposant de nouvelles séquences gestuelles à imiter (Goyen et coll., 2011 ; Elbasan et coll., 2012 ; Reynolds et coll., 2017). Ces pauvres capacités imitatives de postures complexes nouvelles ou d'enchaînement inédit de gestes révélées chez les enfants présentant un TDC (Reynolds et coll., 2017) sont cohérentes avec les déficits d'imitation de gestes fonctionnels rapportés également chez les enfants porteurs d'un TDC (Dewey, 1993 ; Dewey et Kaplan, 1992 ; Sinani et coll., 2011, Vaivre-Douret et coll., 2011a et 2011b). Enfin, une étude récente (Xavier et coll., 2017) alerte sur le fait que ce déficit précoce d'imitation chez les enfants présentant un TDC pourrait influencer l'expression émotionnelle du couplage perception-action et, dans les cas les plus sévères, impacter négativement le développement de la cognition sociale.

## **L'hypothèse d'un déficit des représentations internes : l'apport des neurosciences**

Formulé dès 2004 par Wilson et ses collaborateurs, et récemment étayé par quelques revues de questions pertinentes (Wilson et coll., 2013 et 2017 ; Adams et coll., 2014), ce modèle explicatif présente l'avantage majeur d'introduire de la cohérence dans une liste abondante de déficits et constitue à l'heure actuelle une des pistes les plus heuristiques pour comprendre le TDC. Cette hypothèse suggère que le TDC repose sur un déficit fondamental à utiliser de façon efficace les modèles internes sensorimoteurs (Williams et coll., 2006 ; Jover et coll., 2010 ; Biancotto et coll., 2011 ; Ferguson et coll., 2015 ; Adams et coll., 2016). Comme le système moteur subit de nombreux changements au cours de la vie (développement, vieillissement, pathologies, adaptation aux milieux extrêmes, etc.), les modèles internes doivent être nécessairement adaptables. Ces informations se retrouvent au niveau cérébral sous forme de représentations internes renseignant sur les caractéristiques de l'action que le corps réalise et sur son interaction avec l'environnement (Assaiante et coll., 2014). Cette représentation interne des segments corporels en mouvement a été conceptualisée sous le terme de schéma corporel (Head et Holmes, 1911 ; Maravita et coll., 2003 ; Dijkerman et de Haan, 2007). Le schéma corporel est alimenté par les différentes afférences sensorielles, parmi lesquelles la proprioception joue un rôle prédominant (Paillard, 1982 ; Proske et Gandevia, 2012 ; Pfeiffer et coll., 2013). Quelques rares travaux révèlent un retard dans le développement de l'acuité proprioceptive chez les enfants présentant un TDC (Li et coll., 2014) ainsi que des difficultés dans le traitement des informations tactiles (O'Brien et coll., 2008) et des localisations précises des sources de stimulation (Johnston et coll., 2017). Par ailleurs, une représentation du corps erronée est suggérée comme par exemple, dans la reconnaissance des doigts touchés (Vaivre-Douret et coll., 2012). Il est très surprenant que le développement du schéma corporel et de l'intégration proprioceptive soient aussi peu explorés chez l'enfant porteur d'un TDC.

Les accès privilégiés pour explorer les représentations internes de l'action sont les protocoles d'imagerie motrice, dans lesquels le sujet doit imaginer et non réaliser la tâche proposée. Alors même que cette hypothèse d'un déficit des modèles internes recueille de nombreuses adhésions dans la communauté des chercheurs étudiant le TDC, il demeure surprenant qu'aucun item relevant de ce concept ne soit encore inclus à l'heure actuelle dans l'évaluation du TDC. Dès 2004, Wilson et collaborateurs préconisaient déjà d'associer au MABC des tâches additionnelles standardisées basées sur le contrôle prédictif et l'imagerie motrice (Wilson et coll., 2004). À ce

propos, le *Florida test*, qui évalue les capacités d'idéation motrice, a été proposé à des enfants présentant un TDC (Sinani et coll., 2011). Il ressort de cette étude que des difficultés de représentations spatiales touchent les gestes complexes, comme par exemple l'utilisation d'une paire de ciseaux, pour l'ensemble des enfants porteurs d'un TDC recrutés en scolaire ou en clinique. En revanche, les enfants de cette étude n'ont pas de difficultés dans l'évaluation des articulations impliquées dans l'action désignée, à la différence d'une étude antérieure rapportée par Wilson et ses collaborateurs en 2001, pour qui l'essentiel des troubles se retrouvait dans la sous-échelle kinesthésique. Une différence à la fois sur la difficulté des items proposés et sur la sévérité des difficultés motrices des deux échantillons pourrait expliquer ces résultats contradictoires. Un test unifié et adapté pour évaluer les capacités d'imagerie motrice des enfants présentant un TDC devient indispensable.

Dans tous les cas, apparaît la possibilité de désordres visuo-spatiaux et proprioceptifs qui soulignent la perturbation de la représentation du corps en action. Une étude récente rapporte que le traitement des verbes d'action est également affecté chez des enfants porteurs d'un TDC qui ne présentent, par ailleurs, aucun trouble de langage ou d'attention (Mirabella et coll., 2017). Ces derniers résultats s'accordent pleinement avec un déficit des représentations, et nous indiquent l'étendue des différents niveaux impactés. Afin de mieux appréhender toute la complexité des représentations internes, il devient indispensable de procéder à des tests complémentaires afin de recueillir massivement chez les enfants porteurs d'un TDC des données d'imagerie motrice, dont les performances sont rapportées plus lentes et moins précises que celles des enfants contrôles (Adams et coll., 2016).

## Représentations internes de l'action pour anticiper et apprendre

Une atteinte des représentations internes compromet significativement les capacités d'anticipation et d'apprentissage des enfants présentant un TDC. En effet, nos actions sont dirigées vers le futur et leur contrôle est basé sur l'anticipation de ce qui va se produire. La réalisation efficace d'une action implique la prédiction de ses conséquences afin que la perturbation provoquée par l'action ne mette pas en péril l'équilibre de l'ensemble du corps ou encore permette une correction en cours d'exécution. Le contrôle prédictif est possible parce que les évènements dans l'environnement sont gouvernés par des règles et des régularités que l'enfant va apprendre à connaître et à intégrer dans son contrôle anticipé de l'action, que ce soit par rapport à l'environnement physique (intégration des règles d'inertie ou de gravité), à

son propre corps ou encore par rapport aux interactions sociales (Von Hofsten, 2013). Les preuves expérimentales en faveur de l'existence des modèles internes prédictifs dans le contrôle moteur sont nombreuses chez l'adulte (voir pour revue Flanagan et coll., 1993 ; Wolpert et Miall 1996 ; Flanagan et Wing, 1997) et également chez l'enfant (Schmitz et coll., 1999 et 2002 ; Cignetti et coll., 2013 ; Assaiante et coll., 2014). Bien que fonctionnels précocement chez l'enfant au développement typique, aux environs de 3-4 ans (Schmitz et coll., 2002 ; Cignetti et coll., 2013), les modèles internes connaissent une lente maturation jusqu'à l'âge adulte ; les adolescents de 16 ans présentent encore des performances inférieures à celles des adultes (Barlaam et coll., 2012 ; Assaiante et coll., 2014).

Les difficultés à anticiper que rencontrent les enfants présentant un TDC concernent différents aspects. Tout d'abord la coordination posture-mouvement qui permet l'exécution du geste et le maintien de l'équilibre est affectée. Des perturbations des ajustements posturaux anticipés ont été rapportées aussi bien dans des tâches bimanuelles de délestage (Jover et coll., 2010) que dans des tâches impliquant les membres inférieurs telles que frapper dans un ballon, grimper des escaliers ou se tenir en appui unipodal (Kane et Barden, 2012 et 2013). Ces mêmes déficits temporels d'anticipation ont été rapportés à l'occasion d'évitement d'obstacles survenus de façon inattendue (Wilmot et Barnett, 2017). Des anomalies du traitement des signaux de la copie d'efférence, en perturbant la prédiction, pourraient être à l'origine de la maladresse des enfants porteurs d'un TDC (Katschmarsky et coll., 2001). En effet, le mécanisme de copie d'efférence prédit et corrige les conséquences du mouvement volontaire avant que les réafférences sensorielles liées à l'exécution du mouvement ne soient disponibles (Crammond, 1997). Une altération de ce mécanisme entraînerait un contrôle moteur plus axé sur les retours sensoriels lents et affecterait ainsi la fluidité et la performance de la motricité.

Le contrôle dit « en ligne » est une forme de contrôle anticipé qui s'exerce alors même que l'action est déjà lancée. Si de nombreux travaux rapportent que le contrôle en ligne rapide est altéré chez les enfants présentant un TDC (Hyde et Wilson, 2010, 2011 et 2013), il semblerait que le contrôle en ligne pur soit préservé (Plumb et coll., 2008) à condition de respecter un timing optimal de l'information visuelle délivrée qui pourrait dépendre de façon cruciale de la tâche à accomplir. L'information délivrée trop en avance se ferait au détriment de la performance (Oliveira et coll., 2014). En fait, ce ne serait pas directement le contrôle en ligne qui serait affecté, mais l'intégration du contrôle en ligne avec la planification qui serait atteinte. Cette information est cohérente avec les difficultés rencontrées par les sujets porteurs d'un TDC pour intégrer les informations visuelles distales préparatoires

avec les informations produites au cours de l'exécution de l'action (Oliveira et Wann, 2010). Dans la même lignée, Wilmot et Wann (2008) rapportent que les enfants présentant un TDC ne tirent aucun bénéfice des indices prédictifs de mouvement, sur des traitements de courte durée ; en revanche, ils peuvent commencer à s'améliorer sur un traitement de plus longue durée. Ainsi ce débat autour de l'atteinte du contrôle anticipé en ligne, a le mérite de dissocier différentes composantes de l'anticipation, dont toutes ne seraient pas affectées, et de rapporter, une fois de plus, l'hétérogénéité de la population porteuse d'un TDC.

À ce propos, quelques études récentes (Smits-Engelsman et coll., 2015 ; Jelsma et coll., 2016 ; Cignetti et coll., 2018) réalisées avec des enfants présentant un TDC sans comorbidité, nuancent l'hypothèse d'un déficit du modèle interne chez les enfants présentant un TDC, précédemment décrite dans la littérature (Williams et coll., 2006 ; Ferguson et coll., 2015 ; Adams et coll., 2016). Dans une étude récente utilisant la tâche de délestage bimanuelle, les enfants porteurs d'un TDC, sans comorbidité, ne montrent aucun déficit des performances de stabilisation posturale, ni de réglage temporel, soulignant la capacité de ces enfants à anticiper les perturbations induites par leur propre mouvement. Bien que contrastant avec des résultats antérieurs produits avec le même protocole chez des enfants porteurs d'un TDC non renseignés sur la présence éventuelle d'une comorbidité (Jover et coll., 2010), ces nouveaux résultats (Cignetti et coll., 2018) s'accordent avec des études récentes, relatant une aptitude intacte des enfants présentant un TDC à la prédiction motrice lors de situation d'équilibre dynamique (Smits-Engelsman et coll., 2015 ; Jelsma et coll., 2016). Même s'il est maintenant clairement admis que la comorbidité est davantage une règle qu'une exception chez les enfants présentant un TDC (Vaivre-Douret, 2014), les études ne distinguent pas systématiquement les effets de la comorbidité. Un déficit dans le réglage temporel anticipé des activités musculaires a été observé seulement dans le cas de la comorbidité dyslexie/TDC (Cignetti et coll., 2018). Ainsi les divergences quant à l'existence ou pas de déficit de l'anticipation chez les enfants porteurs d'un TDC pourraient être sous-tendues par la présence ou pas de comorbidité dans le recrutement des sujets, ce qui pose de nouvelles questions et pourrait nuancer certains résultats antérieurs.

## Réactualisation rapide des modèles internes : la difficulté majeure des apprentissages moteurs

Nous avons vu précédemment que des déficits dans les capacités à imiter et à observer peuvent considérablement entraver l'apprentissage moteur chez

les enfants présentant un TDC. La majorité des études qui ont exploré l'imitation de gestes transitifs (avec actions sur les objets) ou intransitifs (sans action sur les objets) rapportent de faibles performances des enfants porteurs d'un TDC en comparaison de leurs pairs (Hill et coll., 1998 ; Zoia et coll., 2002 ; Sinani et coll., 2011).

Étudier les capacités d'apprentissage est un moyen d'accéder à la formation de nouvelles représentations. En effet, selon la théorie des modèles internes (Wolpert et Garamani, 2000), le signal d'erreur entre les conséquences prédites de l'action et ses conséquences sensorielles réelles permet de réactualiser les représentations internes et, *in fine*, de réaliser une adaptation sensorimotrice. Une étude récente a précisément testé les capacités d'une trentaine d'enfants porteurs d'un TDC à construire une nouvelle représentation permettant d'anticiper les conséquences d'un soulèvement d'objet, artificiellement mis en place, à partir de 60 essais (Laborieux, 2017). Il ressort de cette étude et d'autres travaux plus anciens sur des échantillons plus restreints (Kagerer et coll., 2004 et 2006 ; King et coll., 2011) que la mise à jour des modèles internes, avec une forte contrainte de temps, nécessaire aux apprentissages sensorimoteurs est affectée chez les enfants présentant un TDC. Dans la même lignée, des capacités altérées d'apprentissage de séquences ont été rapportées aussi bien lors de tâches visuo-motrices (Kagerer et coll., 2004 ; Gheysen et coll., 2011), que de tâches de séquences digitales (Biotteau et coll., 2015). En fait, les apprentissages sensorimoteurs semblent possibles, mais avec un moindre gain et une dynamique d'apprentissage plus lente que les enfants au développement typique (King et coll., 2011 ; Laborieux, 2017), notamment s'agissant de la première phase caractérisée par une amélioration rapide et massive (Doyon et coll., 2009). Par ailleurs, comme dans l'étude de Biotteau et ses collaborateurs (2015), les résultats des enfants porteurs d'un TDC avec ou sans comorbidité sont très similaires et ne permettent pas de conclure quant à un éventuel effet de la comorbidité sur les capacités d'apprentissage. Une approche corrélationnelle cerveau/comportement mettant en lien protocoles d'apprentissage moteur et enregistrements cérébraux devrait être une piste prometteuse pour explorer chez les enfants présentant un TDC les boucles cortico-striatales et cortico-cérébelleuses impliquées dans l'adaptation motrice (Doyon et coll., 2003), le striatum et les ganglions de la base impliqués dans l'apprentissage de la séquence (Gheysen et coll., 2011) ainsi qu'un éventuel dysfonctionnement cérébelleux, qui semble faire consensus dans la littérature (Wilson et coll., 2013).

## Le cervelet, le cervelet, vous dis-je ! Une structure clé dans le développement cognitivo-moteur et dans les troubles des apprentissages

Les revues récentes qui tentent d'établir l'origine neurobiologique des troubles sensorimoteurs rapportés chez les enfants présentant un TDC mettent en avant aussi bien un déficit d'automatisation, qu'un déficit des modèles internes ou encore d'apprentissage moteur, qui ont toutes en commun l'implication du cervelet (Zwicker et coll., 2012 ; Adams et coll., 2014). Un dysfonctionnement du cervelet pourrait également expliquer certaines comorbidités, comme avec l'hyperactivité (Kadesjo et Gillberg, 1999 ; Dewey et coll., 2002 ; Piek et Dyck, 2004 ; Watemala et coll., 2007) et la dyslexie (Nicolson et coll., 2001 ; Zwiecker et coll., 2009). Des différences de symétrie structurelle, de volume de la substance grise et de la substance blanche ont été rapportées aux niveaux du lobe pariétal inférieur, du gyrus frontal inférieur et du cervelet pour la dyslexie et le TDC (Eckert, 2004). Un dysfonctionnement du cervelet expliquerait des difficultés multiples et variées telles que phonologiques *via* le système articulatoire, des problèmes de séquences visuo-motrices, des troubles de la coordination, de maladresse et d'adaptation motrice (Wilmot et coll., 2006 ; Cantin et coll., 2007 ; Hyde et Wilson, 2011 ; Stoodley et Stein, 2013).

Il est vrai que le cervelet est une structure clé pour le contrôle moteur et les apprentissages sensorimoteurs puisqu'il permettrait de générer les modèles internes prédictifs (Wolpert et coll., 1998). Le cervelet serait impliqué dans la supervision et l'optimisation des mouvements grâce aux retours sensoriels principalement proprioceptifs, lui permettant ainsi d'estimer les erreurs d'une conséquence sensorielle (Desmurget et Grafton, 2000 ; Herzfeld et Shadmehr, 2013 ; Laurens et coll., 2013). En effet, le cervelet présente une activité spécifique lorsque les conséquences sensorielles d'une action divergent de celles initialement estimées. Cependant, le cervelet ne semble pas être la seule structure impliquée dans l'estimation des conséquences sensorielles d'une action. Le cortex pariétal postérieur interviendrait également dans l'estimation des conséquences sensorielles d'une action en situation de conflit sensoriel (Blakemore et Sirigu, 2003).

Si le développement des représentations internes est bien documenté grâce aux données comportementales, en revanche, la connaissance de leur corrélatés cérébraux depuis l'enfance jusqu'à l'âge adulte demeure encore largement insuffisante. Des études récentes ont révélé que l'émergence des représentations internes pourrait résulter d'une dynamique cérébrale à grande échelle, fruit d'interactions entre de larges réseaux cérébraux tels que les

réseaux fronto-pariétal, cingulo-operculaire et somato-moteur (Cignetti et coll., 2017 ; Fontan et coll., 2017). En résumé, la large gamme des rôles joués par le cervelet dans le développement de la cognition motrice (Stoodley, 2016) pourrait expliquer la diversité des troubles répertoriés en fonction de la spécificité des atteintes. Pour élucider les multiples facettes du cervelet, il devient donc urgent d'explorer plus finement, son développement structurel (Zwicker et coll., 2012) aussi bien que fonctionnel, notamment s'agissant de la connectivité fonctionnelle cérébrale à large échelle, en particulier la triade cervelet – cortex pariétal postérieur – cortex frontal inférieur, sur des populations conséquentes d'enfants présentant un TDC en tenant compte de la présence ou non de comorbidité.

## RÉFÉRENCES

- Adams IL, Ferguson GD, Lust JM, *et al.* Action planning and position sense in children with developmental coordination disorder. *Hum Mov Sci* 2016 ; 46 : 196-208.
- Adams IL, Lust JM, Wilson PH, *et al.* Compromised motor control in children with DCD: a deficit in the internal model? A systematic review. *Neurosci Biobehav Rev* 2014 ; 47 : 225-44.
- Adolph KE, Eppler MA, Gibson EJ. Crawling versus walking infants' perception of affordances for locomotion over sloping surfaces. *Child Dev* 1993 ; 64 : 1158-74.
- Aertssen WFM, Ferguson GD, Smits-Engelsman BC. Performance on functional strength measurement and muscle power sprint test confirm poor anaerobic capacity in children with developmental coordination disorder. *Res Dev Disabil* 2016 ; 56 : 115-26.
- Assaiante C. Action and representation of action during childhood and adolescence: a functional approach. *Neurophysiol Clin* 2012 ; 42 : 43-51.
- Assaiante C, Amblard B. An ontogenetic model for the sensorimotor organization of balance control in humans. *Hum Mov Sci* 1995 ; 14 : 13-43.
- Assaiante C, Mallau S, Viel S, *et al.* Development of postural control in healthy children: a functional approach. *Neural Plast* 2005 ; 12 : 109-18.
- Assaiante C, Barlaam F, Cignetti FV, *et al.* Body schema building during childhood and adolescence: a neurosensory approach. *Neurophysiol Clin* 2014 ; 44 : 3-12.
- Astill S. Can children with developmental coordination disorder adapt to task constraints when catching two-handed? *Disabil Rehabil* 2007 ; 29 : 57-67.
- Astill S, Utley A. Two-handed catching in children with developmental coordination disorder. *Motor Control* 2006 ; 10 : 109-24.

Astill S, Uteley A. Coupling of the reach and grasp phase during catching in children with developmental coordination disorder. *J Mot Behav* 2008 ; 40 : 315-23.

Ayres AJ. *Sensory integration and praxis tests (SIPT)*. Los Angeles : Western Psychological Services, 1989.

Bair WN, Barela JA, Whitall J, *et al.* Children with developmental coordination disorder benefit from using vision in combination with touch information for quiet standing. *Gait Posture* 2011 ; 34 : 183-90.

Bair WN, Kiemel T, Jeka JJ, *et al.* Development of multisensory reweighting is impaired for quiet stance control in children with developmental coordination disorder (DCD). *PLoS One* 2012 ; 7 : e40932.

Barlaam F, Fortin C, Vaugoyeau M, *et al.* Development of action representation during adolescence as assessed from anticipatory control in a bimanual load-lifting task. *Neurosci* 2012 ; 221 : 56-68.

Bernardi M, Leonard HC, Hill EL, *et al.* Brief report: response inhibition and processing speed in children with motor difficulties and developmental coordination disorder. *Child Neuropsychol* 2016 ; 22 : 627-34.

Biotteau M, Chaix Y, Albaret JM. Procedural learning and automatization process in children with developmental coordination disorder and/or developmental dyslexia. *Hum Mov Sci* 2015 ; 43 : 78-89.

Biancotto M, Skabar A, Bulgheroni M, *et al.* Neuromotor deficits in developmental coordination disorder: evidence from a reach-to-grasp task. *Res Dev Disabil* 2011 ; 32 : 1293-300.

Blais M, Amarantini D, Albaret JM, *et al.* Atypical inter-hemispheric communication correlates with altered motor inhibition during learning of a new bimanual coordination pattern in developmental coordination disorder. *Dev Sci* 2018 ; 21 : e12563.

Blakemore SJ, Frith C. Self-awareness and action. *Curr Opin Neurobiol* 2003 ; 13 : 219-24.

Blakemore SJ, Sirigu A. Action prediction in the cerebellum and in the parietal lobe. *Exp Brain Res* 2003 ; 153 : 239-45.

Çaçola P, Ibane M, Ricard M, *et al.* Children with developmental coordination disorder demonstrate a spatial mismatch when estimating coincident-timing ability with tools. *Res Dev Disabil* 2016 ; 48 : 124-31.

Cantin N, Polatajko HJ, Thach WT *et al.* Developmental coordination disorder: exploration of a cerebellar hypothesis. *Hum Mov Sci* 2007 ; 26 : 491-509.

Cantin N, Ryan J, Polatajko HJ. Impact of task difficulty and motor ability on visual-motor task performance of children with and without developmental coordination disorder. *Hum Mov Sci* 2014 ; 34 : 217-32.

Chaix Y, Albaret JM. Trouble de l'acquisition de la coordination et déficits visuo-spatiaux. *Développements* 2014 ; 15 : 32-43.

- Chen FC, Tsai CL. Light finger contact concurrently reduces postural sway and enhances signal detection performance in children with developmental coordination disorder. *Gait Posture* 2016 ; 45 : 193-7.
- Chen FC, Wu SK. Perceived hole size, performance, and body movement during putting in children with and without probable developmental coordination disorder. *Motor Control* 2013 ; 17 : 382-98.
- Chen FC, Tsai CL, Stoffregen TA, *et al.* Postural responses to a suprapostural visual task among children with and without developmental coordination disorder. *Res Dev Dis* 2011 ; 32 : 1948-56.
- Chen FC, Tsai CL, Wu SK. Postural sway and perception of affordances in children at risk for developmental coordination disorder. *Expl Brain Res* 2014 ; 232 : 2155-65.
- Cheng CH, Ju YY, Chang HW, *et al.* Motor impairments screened by the movement assessment battery for children-2 are related to the visual-perceptual deficits in children with developmental coordination disorder. *Res Dev Disab* 2014 ; 35 : 2172-9.
- Cherng RJ, Hsu YW, Chen YJ, *et al.* Standing balance of children with developmental coordination disorder under altered sensory conditions. *Hum Mov Sci* 2007 ; 26 : 913-26.
- Cherng RJ, Liang LY, Chen YJ, *et al.* The effects of a motor and a cognitive concurrent task on walking in children with developmental coordination disorder. *Gait Posture* 2009 ; 29 : 204-7.
- Chia LC, Licari MK, Guelfi KJ, *et al.* A comparison of running kinematics and kinetics in children with and without developmental coordination disorder. *Gait Posture* 2013 ; 38 : 264-9.
- Chokron S, Dutton GN. Impact of cerebral visual impairments on motor skills: Implications for developmental coordination disorders. *Front Psychol* 2016 ; 7 : 1471.
- Chung HC, Stoffregen TA. Postural responses to a moving room in children with and without developmental coordination disorder. *Res Dev Disabil* 2011 ; 32 : 2571-6.
- Cignetti F, Zedka M, Vaugoyeau M, Assaiante C. Acquisition of independent walking favours emergence of postural anticipation and exocentric balance control. *PLoS One* 2013 ; 8 : e56313.
- Cignetti F, Fontan A, Menant J, *et al.* Protracted development of the proprioceptive brain network during and beyond adolescence. *Cereb Cortex* 2017 ; 27 : 1285-96.
- Cignetti F, Vaugoyeau M, Fontan A, *et al.* Feedforward motor control in developmental dyslexia and developmental coordination disorder: does comorbidity matter? *Res Dev Disabil* 2018 ; 76 : 25-34.
- Clark JE, Whitall J. Developmental coordination disorder: function, participation, and assessment. *Res Dev Disabil* 2011 ; 32 : 1243-4.
- Crammond DJ. Motor imagery: never in your wildest dream. *Trends Neurosci* 1997 ; 20 : 54-7.

- Crawford SG, Dewey D. Co-occurring disorders: a possible key to visual perceptual deficits in children with developmental coordination disorder. *Hum Mov Sci* 2008 ; 27 : 154-69.
- Creavin AL, Lingam R, Northstone K, *et al.* Ophthalmic abnormalities in children with developmental coordination disorder. *Dev Med Child Neurol* 2014 ; 56 : 164-70.
- De Castelneau P, Albaret JM, Chaix Y, *et al.* Developmental coordination disorder pertains to a deficit in perceptuo-motor synchronization independent of attentional capacities. *Hum Mov Sci* 2007 ; 26 : 477-90.
- De Castelneau P, Albaret JM, Chaix Y, *et al.* A study of EEG coherence in DCD children during motor synchronization task. *Hum Mov Sci* 2008 ; 27 : 230-41.
- Deconinck FJA, De Clercq D, Savelsbergh GJP, *et al.* Visual contribution to walking in children with developmental coordination disorder. *Child Care Health Dev* 2006a ; 32 : 711-22.
- Deconinck FJA, De Clercq D, Savelsbergh GJP, *et al.* Differences in gait between children with and without developmental coordination disorder. *Motor Control* 2006b ; 10 : 125-42.
- Deconinck FJA, De Clercq D, Van Coster R, *et al.* Sensory contributions to balance in boys with developmental coordination disorder. *Adapt Phys Activ Q* 2008 ; 25 : 17-35.
- Deconinck FJA, Savelsbergh GJ, De Clercq D, *et al.* Balance problems during obstacle crossing in children with developmental coordination disorder. *Gait Posture* 2010 ; 32 : 327-31.
- De Castro Ferracioli M, Hiraga CY, Pellegrini AM. Emergence and stability of inter-limb coordination patterns in children with developmental coordination disorder. *Res Dev Disabil* 2014 ; 35 : 348-56.
- Desmurget M, Grafton S. Forward modeling allows feedback control for fast reaching movements. *Trends Cogn Sci* 2000 ; 4 : 423-31.
- Dewey D. Error analysis of limb and orofacial praxis in children with developmental motor deficits. *Brain Cogn* 1993 ; 23 : 203-21.
- Dewey D, Kaplan BJ. Analysis of praxis task demands in the assessment of children with developmental motor deficits. *Dev Neuropsychol* 1992 ; 8 : 367-79.
- Dewey D, Kaplan BJ, Crawford SG, *et al.* Developmental coordination disorder: associated problems in attention, learning, and psychosocial adjustment. *Hum Mov Sci* 2002 ; 21 : 905-18.
- Diamond N, Downs J, Morris S. The problem with running – Comparing the propulsion strategy of children with developmental coordination disorder and typically developing children. *Gait Posture* 2014 ; 39 : 547-52.
- Dijkerman HC, de Haan EHF. Somatosensory processing subserving perception and action: dissociations, interactions, and integration. *Behav Brain Sci* 2007 ; 30 : 224-30.

Doyon J, Penhune V, Ungerleider LG. Distinct contribution of the cortico-striatal and cortico-cerebellar systems to motor skill learning. *Neuropsychologia* 2003 ; 41 : 252-62.

Doyon J, Bellec P, Amsel R, *et al.* Contributions of the basal ganglia and functionally related brain structures to motor learning. *Behav Brain Res* 2009 ; 12 : 61-75.

Elbasan B, Kayihan H, Duzgun I. Sensory integration and activities of daily living in children with developmental coordination disorder. *Ital J Pediatr* 2012 ; 38 : 14.

Eckert M. Neuroanatomical markers for dyslexia: a review of dyslexia structural imaging studies. *Neuroscientist* 2004 ; 10 : 362-71.

Elders V, Sheehan S, Wilson AD, *et al.* Head-torso-hand coordination in children with and without developmental coordination disorder. *Dev Med Child Neurol* 2010 ; 52 : 238-43.

Ferguson GD, Duysens J, Smits-Engelsman BC. Children with Developmental Coordination Disorder are deficient in a visuo-manual tracking task requiring predictive control. *Neurosci* 2015 ; 286 : 13-26.

Flanagan JR, Ostry DJ, Feldman AG. Control of trajectory modifications in target-directed reaching. *J Mot Behav* 1993 ; 25 : 140-52.

Flanagan JR, Wing AM. The role of internal models in motion planning and control: evidence from grip force adjustments during movements of hand-held loads. *J Neurosci* 1997 ; 17 : 1519-28.

Fletcher-Flinn C, Elmes H, Strugnell D. Visual-perceptual and phonological factors in the acquisition of literacy among children with congenital developmental coordination disorder. *Dev Med Child Neurol* 1997 ; 39 : 158-66.

Fong SS, Lee VY, Pang MY. Sensory organization of balance control in children with developmental coordination disorder. *Res Dev Disabil* 2011 ; 32 : 2376-82.

Fong SS, Tsang WW, Ng GY. Altered postural control strategies and sensory organization in children with developmental coordination disorder. *Hum Mov Sci* 2012 ; 31 : 1317-27.

Fong SS, Ng SS, Yiu BP. Slowed muscle force production and sensory organization deficits contribute to altered postural control strategies in children with developmental coordination disorder. *Res Dev Disabil* 2013 ; 34 : 3040-8.

Fong SS, Ng SS, Guo X, *et al.* Deficits in lower limb muscle reflex contraction latency and peak force are associated with impairments in postural control and gross motor skills of children with developmental coordination disorder: a cross-sectional study. *Medicine (Baltimore)* 2015 ; 94 : e1785.

Fong SS, Guo X, Liu KP, *et al.* Task-specific balance training improves the sensory organisation of balance control in children with developmental coordination disorder: a randomised controlled trial. *Sci Rep* 2016a ; 6 : 20945.

Fong SS, Ng SS, Chung LM, *et al.* Direction-specific impairment of stability limits and falls in children with developmental coordination disorder: implications for rehabilitation. *Gait Posture* 2016b ; 43 : 60-4.

- Fontan A, Cignetti F, Nazarian B, *et al.* How does the body representation system develop in the human brain? *Dev Cogn Neurosci* 2017 ; 24 : 118-28.
- Gaymard B, Giannitelli M, Challes G *et al.* Oculomotor impairments in developmental dyspraxia. *Cerebellum* 2017 ; 16 : 411-20.
- Gentle J, Barnett AL, Wilmut K. Adaptations to walking on an uneven terrain for individuals with and without developmental coordination disorder. *Hum Mov Sci* 2016 ; 49 : 346-53.
- Geuze RH. Static balance and developmental coordination disorder. *Hum Mov Sci* 2003 ; 22 : 527-48.
- Geuze RH. Postural control in children with developmental coordination disorder. *Neural Plast* 2005 ; 12 : 183-96.
- Geuze RH, Kalverboer AF. Inconsistency and adaptation in timing of clumsy children. *J Hum Mov Stud* 1987 ; 13 : 421-32.
- Geuze RH, Kalverboer AF. Tapping a rhythm: a problem of timing for children who are clumsy and dyslexic? *Adapt Phys Activ Q* 1994 ; 11 : 203-13.
- Gheysen F, Van Waelvelde H, Fias W. Impaired visuo-motor sequence learning in developmental coordination disorder. *Res Dev Disabil* 2011 ; 32 : 749-56.
- Gibson JJ. *The ecological approach to perception*. Londres : Houghton Mifflin, 1979.
- Gibson JJ, Walk RD. The visual cliff. *Sci Am* 1960 ; 202 : 67-71.
- Goyen TA, Lui K, Hummell J. Sensorimotor skills associated with motor dysfunction in children born extremely preterm. *Early Hum Dev* 2011 ; 87 : 489-93.
- Grinter EJ, Maybery MT, Badcock DR. Vision in developmental disorders: is there a dorsal stream deficit. *Brain Res Bull* 2010 ; 82 : 147-60.
- Grove CR, Lazarus JAC. Impaired re-weighting of sensory feedback for maintenance of postural control in children with developmental coordination disorder. *Hum Mov Sci* 2007 ; 26 : 457-76.
- Head H, Holmes G. Sensory disturbances from cerebral lesions. *Brain* 1911 ; 34 : 102 -254.
- Herzfeld DJ, Shadmehr R. Cerebellum estimates the sensory state of the body. *Trends Cogn Sci* 2013 ; 18 : 66-7.
- Hill EL, Bishop DVM, Nimmo-Smith I. Representational gestures in developmental coordination disorder and specific language impairment: error-types and the reliability of ratings. *Hum Mov Sci* 1998 ; 17 : 655-78.
- Hyde C, Wilson PH. Dissecting online control in developmental coordination disorder: a kinematic analysis of double-step reaching. *Brain Cogn* 2011a ; 75 : 232-41.
- Hyde C, Wilson PH. Online motor control in children with developmental coordination disorder: chronometric analysis of double-step reaching performance. *Child Care Health Dev* 2011b ; 37 : 111-22.

Hyde CE, Wilson PH. Impaired online control in children with developmental coordination disorder reflects developmental immaturity. *Dev Neuropsychol* 2013 ; 38 : 81-97.

Iacoboni M, Dapretto M. The mirror neuron system and the consequences of its dysfunction. *Nat Rev Neurosci* 2006 ; 7 : 942-51.

Irani F. Visuospatial ability. In : Kreutzer JS, DeLuca J, Caplan B (eds). *Encyclopedia of clinical neuropsychology*. New York : Springer, 2011 ; 2656.

Jelsma LD, Smits-Engelsman BCM, Krijnen WP, *et al.* Changes in dynamic balance control over time in children with and without developmental coordination disorder. *Hum Mov Sci* 2016 ; 49 : 148-59.

Johnson DC, Wade MG. Judgement of action capabilities in children at risk for developmental coordination disorder. *Disabil Rehabil* 2007 ; 29 : 33-45.

Johnson DC, Wade MG. Children at risk for developmental coordination disorder: judgement of changes in action capabilities. *Dev Med Child Neurol* 2009 ; 51 : 397-403.

Johnston JS, Ali JB, Hill EL, *et al.* Tactile localization performance in children with developmental coordination disorder (DCD) corresponds to their motor skill and not their cognitive ability. *Hum Mov Sci* 2017 ; 53 : 72-83.

Jover M, Schmitz C, Centelles L, *et al.* Anticipatory postural adjustments in a bimanual load-lifting task in children with developmental coordination disorder. *Dev Med Child Neurol* 2010 ; 52 : 850-5.

Kadesjo B, Gillberg C. Developmental coordination disorder in swedish 7-year-old children. *J Am Acad Child Adolesc Psychiatry* 1999 ; 38 : 820-8.

Kagerer FA, Bo J, Contreras-Vidal JL *et al.* Visuomotor adaptation in children with developmental coordination disorder. *Motor Control* 2004 ; 8 : 450-60.

Kagerer FA, Contreras-Vidal JL, Bo J, *et al.* Abrupt, but not gradual visuomotor distortion facilitates adaptation in children with developmental coordination disorder. *Hum Mov Sci* 2006 ; 25 : 622-33.

Kane K, Barden J. Contributions of trunk muscles to anticipatory postural control in children with and without developmental coordination disorder. *Hum Mov Sci* 2012 ; 31 : 707-20.

Kane K, Barden J. Frequency of anticipatory trunk muscle onsets in children with and without developmental coordination disorder. *Phys Occup Ther Pediatr* 2013 ; 34 : 75-89.

Katschmarsky S, Cairney S, Maruff P, *et al.* The ability to execute saccades on the basis of efference copy: impairments in double-step saccade performance in children with developmental coordination disorder. *Exp Brain Res* 2001 ; 136 : 73-8.

Kelso JA. Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 1984 ; 246 : R1000-4.

King BR, Harring JR, Oliveira MA, *et al.* Statistically characterizing intra- and inter-individual variability in children with developmental coordination disorder. *Res Dev Disabil* 2011 ; 32 : 1388-98.

King BR, Clark JE, Oliveira MA. Developmental delay of finger torque control in children with developmental coordination disorder. *Dev Med Child Neurol* 2012 ; 54 : 932-7.

Laborieux A. *Exploration de la fonction d'anticipation et de l'apprentissage moteur chez les enfants avec trouble de l'apprentissage : déficit du modèle interne ?* Mémoire de Master 2 Neuropsychologie et neurosciences cliniques. Toulouse : Université de Toulouse, 2017.

Laufer Y, Ashkenazi T, Josman N. The effects of a concurrent cognitive task on the postural control of young children with and without developmental coordination disorder. *Gait Posture* 2008 ; 27 : 347-51.

Laurens J, Meng H, Angelaki DE. Neural representation of orientation relative to gravity in the macaque cerebellum. *Neuron* 2013 ; 80 : 10.1016.

Law SH, Lo SK, Chow S, *et al.* Grip force control is dependent on task constraints in children with and without developmental coordination disorder. *Int J Rehabil Res* 2011 ; 34 : 93-9.

Lee DN, Aronson E. Visual proprioceptive control of standing in human infants. *Percept Psychophys* 1974 ; 15 : 529-32.

Li KY, Su WJ, Fu HW, *et al.* Kinesthetic deficit in children with developmental coordination disorder. *Res Dev Disabil* 2015 ; 38 : 125-33.

Licari MK, Larkin D, Miyahara M. The influence of developmental coordination disorder and attention deficits on associated movements in children. *Hum Mov Sci* 2006a ; 25 : 90-9.

Licari MK, Billington J, Reid SL, *et al.* Cortical functioning in children with developmental coordination disorder: a motor overflow study. *Exp Brain Res* 2015 ; 233 : 1703-10.

Licari MK, Reynolds JE. Understanding performance variability in developmental coordination disorder: what does it all mean? *Curr Dev Disord Rep* 2017 ; 4 : 53-9.

Mackenzie SJ, Getchell N, Deutsch K, *et al.* Multi-limb coordination and rhythmic variability under varying sensory availability conditions in children with DCD. *Hum Mov Sci* 2008 ; 27 : 256-69.

Mak MK. Reaching and grasping a moving target is impaired in children with developmental coordination disorder. *Pediatr Phys Ther* 2010 ; 22 : 384-91.

Maravita A, Spence C, Driver J. Multisensory integration and the body schema: close to hand and within reach. *Curr Biol* 2003 ; 13 : 531-9.

Meltzoff AN, Moore MK. Imitation of facial and manual gestures by human neonates. *Science* 1977 ; 198 : 75-8.

Meltzoff AN, Moore MK. Imitation, memory, and the representation of persons. *Infant Behav Dev* 1994 ; 17 : 83-99.

Meltzoff AN, Moore MK. Explaining facial imitation: a theoretical model. *Early Dev Parent* 1997 ; 6 : 179-92.

Mirabella G, Del Signore S, Lakens D, *et al.* Developmental coordination disorder affects the processing of action-related verbs. *Front Hum Neurosci* 2017 ; 10 : 661.

Mon-Williams M, Tresilian JR, Bell VE, *et al.* The preparation of reach-to-grasp movements in adults, children, and children with movement problems. *Q J Exp Psychol A* 2005 ; 58 : 1249-63.

Nicolson RI, Fawcett AJ, Dean P. Developmental dyslexia: the cerebellar deficit hypothesis. *Trends Neurosci* 2001 ; 24 : 508-11.

Niedenthal PM. Embodying emotion. *Science* 2007 ; 316 : 1002-5.

O'Brien J, Spencer J, Atkinson J *et al.* Form and motion coherence processing in dyspraxia: evidence of a global spatial processing deficit (English). *Neuroreport (Oxford)* 2002 ; 13 : 1399-402.

O'Brien J, Williams HG, Bundy A, *et al.* Mechanisms that underlie coordination in children with developmental coordination disorder. *J Mot Behav* 2008 ; 40 : 43-61.

Oliveira RF de, Wann JP. Integration of dynamic information for visuomotor control in young adults with developmental coordination disorder. *Exp Brain Res* 2010 ; 205 : 387-94.

Oliveira RF de, Wann JP. Driving skills of young adults with developmental coordination disorder: regulating speed and coping with distraction. *Res Dev Disabil* 2011 ; 32 : 1301-8.

Oliveira RF de, Bilngton J, Wann JP. Optimal use of visual information in adolescents and young adults with developmental coordination disorder. *Exp Brain Res* 2014 ; 232 : 2989-95.

Paillard J. Le corps et ses langages d'espace. In : Jeddi E (ed). *Le corps en psychiatrie*. Paris : Masson, 1982 : 53-69.

Pereira HS, Landgren M, Gillberg C, *et al.* Parametric control of fingertip forces during precision grip lifts in children with DCD (developmental coordination disorder) and DAMP (deficits in attention motor control and perception). *Neuropsychologia* 2001 ; 39 : 478-88.

Pfeiffer C, Lopez C, Schmutz V, *et al.* Multisensory origin of the subjective first-person perspective: visual, tactile, and vestibular mechanisms. *PLoS One* 2013 ; 8 : e61751.

Piek JP, Dyck MJ. Sensory-motor deficits in children with developmental coordination disorder, attention deficit hyperactivity disorder and autistic disorder. *Hum Mov Sci* 2004 ; 23 : 475-88.

Pisella L, Sergio L, Blangero A, *et al.* Optic ataxia and the function of the dorsal stream: contributions to perception and action. *Neuropsychologia* 2009 ; 47 : 3033-44.

Pisella L, André V, Gavault E, *et al.* A test revealing the slow acquisition and the dorsal stream substrate of visuo-spatial perception. *Neuropsychologia* 2013 ; 51 : 106-13.

Plumb MS, Wilson AD, Mulroue A, *et al.* Online corrections in children with and without DCD. *Hum Mov Sci* 2008 ; 27 : 695-704.

- Proske U, Gandevia SC. The proprioceptive senses: their roles in signaling body shape, body position and movement, and muscle force. *Physiol Rev* 2012 ; 92 : 1651-97.
- Przysucha EP, Maraj BK. Nature of spatial coupling in children with and without developmental coordination disorder in ball catching. *Adapt Phys Activ Q* 2013 ; 30 : 213-34.
- Przysucha EP, Maraj BKV. Inter-limb coordination and control in boys with and without DCD in ball catching. *Acta Psychologica* 2014 ; 151 : 62-73.
- Purcell C, Wann JP, Wilmut K, *et al.* Roadside judgments in children with developmental coordination disorder. *Res Dev Disabil* 2011 ; 32 : 1283-92.
- Purcell C, Wann JP, Wilmut K, *et al.* Reduced looming sensitivity in primary school children with developmental coordination disorder. *Dev Sci* 2012 ; 15 : 299-306.
- Rafique SA, Northway N. Relationship of ocular accommodation and motor skills performance in developmental coordination disorder. *Hum Mov Sci* 2015 ; 42 : 1-14.
- Rasmussen P, Gillberg C. Natural outcome of ADHD with developmental coordination disorder at age 22 years: a controlled, longitudinal, community-based study. *J Am Acad Child Adolesc Psychiatry* 2000 ; 39 : 1424-31.
- Raynor AJ. Strength, power, and coactivation in children with developmental coordination disorder. *Dev Med Child Neurol* 2001 ; 43 : 676-84.
- Reynolds JE, Kerrigan S, Elliott C, *et al.* Poor imitative performance of unlearned gestures in children with probable developmental coordination disorder. *J Mot Behav* 2017 ; 49 : 378-87.
- Rizzolatti G, Fogassi L, Gallese V. Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action. *Nat Rev Neurosci* 2001 ; 2 : 661-70.
- Rizzolatti G, Fadiga L, Fogassi L, Gallese V. From mirror neurons to imitation: facts and speculations. In : Meltzoff AN, Prinz W (eds). *The imitative mind: development, evolution, and brain bases*. New York : Cambridge University Press, 2002 : 247-66.
- Robert MP, Ingster-Moati I, Albuisson E, *et al.* Vertical and horizontal smooth pursuit eye movements in children with developmental coordination disorder. *Dev Med Child Neurol* 2014 ; 56 : 595-600.
- Roche R, Wilms-Floet AM, Clark JE, *et al.* Auditory and visual information do not affect self-paced bilateral finger tapping in children with DCD. *Hum Mov Sci* 2011 ; 30 : 658-71.
- Rosengren KS, Deconinck FJ, Diberardino LA 3<sup>rd</sup>, *et al.* Differences in gait complexity and variability between children with and without developmental coordination disorder. *Gait Posture* 2009 ; 29 : 225-9.
- Schmitz C, Martin N, Assaiante C. Development of anticipatory postural adjustments in a bimanual load-lifting task in children. *Exp Brain Res* 1999 ; 126 : 200-4.
- Schmitz C, Martin N, Assaiante C. Building anticipatory postural adjustment during childhood: a kinematic and electromyographic analysis of unloading in children from 4 to 8 years of age. *Exp Brain Res* 2002 ; 142 : 354-64.

Schoemaker MM, van der Wees M, Flapper B, *et al.* Perceptual skills of children with developmental coordination disorder. *Hum Mov Sci* 2001 ; 20 : 111-33.

Schott N, El-Rajab I, Klotzbier T. Cognitive-motor interference during fine and gross motor tasks in children with developmental coordination disorder (DCD). *Res Dev Disabil* 2016 ; 57 : 136-48.

Sigmundsson H, Hansen PC, Talcott JB. Do clumsy children have visual deficits. *Behav Brain Res* 2003 ; 139 : 123-9.

Sinani C, Sugden DA, Hill EL. Gesture production in school vs. clinical samples of children with developmental coordination disorder (DCD) and typically developing children. *Res Dev Disabil* 2011 ; 32 : 1270-82.

Smits-Engelsman BC, Wilson PH. Noise, variability, and motor performance in developmental coordination disorder. *Dev Med Child Neurol* 2013 ; 55 : 69-72.

Smits-Engelsman BC, Westenberg Y, Duysens J. Children with developmental coordination disorder are equally able to generate force but show more variability than typically developing children. *Hum Mov Sci* 2008 ; 27 : 296-309.

Smits-Engelsman BC, Blank R, Kaay AC, *et al.* Efficacy of interventions to improve motor performance in children with developmental coordination disorder: a combined systematic review and meta-analysis (provisional abstract). *Dev Med Child Neurol* 2013 ; 55 : 229-37.

Stoodley CJ. The cerebellum and neurodevelopmental disorders. *Cerebellum* 2016 ; 15 : 34-7.

Stoodley CJ, Stein JF. Cerebellar function in developmental dyslexia. *Cerebellum* 2013 ; 12 : 267-76.

Sumner E, Pratt ML, Hill EL. Examining the cognitive profile of children with developmental coordination disorder. *Res Dev Disabil* 2016 ; 56 : 10-7.

Tallet J, Albaret JM, Barral J. Developmental changes in lateralized inhibition of symmetric movements in children with and without developmental coordination disorder. *Res Dev Disabil* 2013 ; 34 : 2523-32.

Tsai CL, Pan CY, Chang YK, *et al.* Deficits of visuospatial attention with reflexive orienting induced by eye-gazed cues in children with developmental coordination disorder in the lower extremities: an event-related potential study. *Res Dev Disabil* 2010 ; 31 : 642-55.

Tsai CL, Wilson PH, Wu SK. Role of visual-perceptual skills (non-motor) in children with developmental coordination disorder. *Hum Mov Sci* 2008 ; 27 : 649-64.

Tsai CL, Wu SK, Huang CH. Static balance in children with developmental coordination disorder. *Hum Mov Sci* 2008 ; 27 : 142-53.

Vaivre-Douret L. Developmental coordination disorders: state of art. *Neurophysiol Clin* 2014 ; 44 : 13-23.

Vaivre-Douret L, Lalanne C, Ingster-Moati I, *et al.* Subtypes of developmental coordination disorder: research on their nature and etiology. *Dev Neuropsychol* 2011a ; 36 : 614-43.

Vaivre-Douret L, Lalanne C, Cabrol D, *et al.* Identification de critères diagnostiques des sous-types de troubles de l'acquisition de la coordination (TAC) ou dyspraxie développementale. *Neuropsychiatr Enfance Adolesc* 2011b ; 59 : 443-53.

Van Elk M, van Schie HT, Hunnius S, *et al.* You'll never crawl alone: neurophysiological evidence for experience-dependent motor resonance in infancy. *Neuroimage* 2008 ; 43 : 808-14.

Van Waelvelde H, De Weerd W, De Cock P, *et al.* Association between visual perceptual deficits and motor deficits in children with developmental coordination disorder. *Dev Med Child Neurol* 2004 ; 46 : 661-6.

Van Waelvelde H, De Weerd W, De Cock P *et al.* Parameterization of movement execution in children with developmental coordination disorder. *Brain Cogn* 2006 ; 60 : 20-31.

Volman MJ, Geuze RH. Stability of rhythmic finger movements in children with a developmental coordination disorder. *Motor Control* 1998 ; 2 : 34-60.

Volman MJ, Laroy ME, Jongmans MJ. Rhythmic coordination of hand and foot in children with developmental coordination disorder. *Child Care Health Dev* 2006 ; 32 : 693-702.

Von Hofsten C. Action in infancy: a foundation for cognitive development. In : Prinz W, Beisert M, Herwig A (eds). *Action science: Foundations of an emerging discipline*. Cambridge, MA : MIT Press, 2013 : 255.

Xavier J, Magnat J, Sherman A *et al.* A developmental and clinical perspective of rhythmic interpersonal coordination: from mimicry toward the interconnection of minds. *J Physiol Paris* 2017 ; 110 : 420-6.

Wade MG, Kazeck M. Developmental coordination disorder and its cause: the road less travelled. *Hum Mov Sci* 2018 ; 57 : 489-500.

Wade MG, Tsai CL, Stoffregen T, *et al.* Perception of object length via manual wielding in children with and without developmental coordination disorder. *J Mot Behav* 2016 ; 48 : 13-9.

Waternberg N, Waiserberg N, Zuk L, *et al.* Developmental coordination disorder in children with attention-deficit-hyperactivity disorder and physical therapy intervention. *Dev Med Child Neurol* 2007 ; 49 : 920-5.

Whitall J, Chang TY, Horn CL, *et al.* Auditory-motor coupling of bilateral finger tapping in children with and without DCD compared to adults. *Hum Mov Sci* 2008 ; 27 : 914-31.

Williams J, Thomas PR, Maruff P, *et al.* Motor, visual and egocentric transformations in children with developmental coordination disorder. *Child Care Health Dev* 2006 ; 32 : 633-47.

Wilmot K, Wann J. The use of predictive information is impaired in the actions of children and young adults with developmental coordination disorder. *Exp Brain Res* 2008 ; 191 : 403-18.

Wilmot K, Wann JP, Brown JH. Problems in the coupling of eye and hand in the sequential movements of children with developmental coordination disorder. *Child Care Health Dev* 2006 ; 32 : 665-78.

Wilmot K, Du W, Barnett AL. Gait patterns in children with developmental coordination disorder. *Exp Brain Res* 2016 ; 234 : 1747-55.

Wilmot K, Du W, Barnett AL. Navigating through apertures: perceptual judgements and actions of children with developmental coordination disorder. *Dev Sci* 2017 ; 20 (6).

Wilson PH, McKenzie BE. Information processing deficits associated with developmental coordination disorder: a meta-analysis of research findings. *J Child Psychol Psychiatr* 1998 ; 39 : 829-40.

Wilson PH, Maruff P, Ives S, *et al.* Abnormalities of motor and praxis imagery in children with DCD. *Hum Mov Sci* 2001 ; 20 : 135-59.

Wilson PH, Maruff P, Butson M, *et al.* Internal representation of movement in children with developmental coordination disorder: a mental rotation task. *Dev Med Child Neurol* 2004 ; 46 : 754-9.

Wilson PH, Ruddock S, Smits-Engelsman B, *et al.* Understanding performance deficits in developmental coordination disorder: a meta-analysis of recent research. *Dev Med Child Neurol* 2013 ; 55 : 217-28.

Wilson PH, Smits-Engelsman B, Caeyenberghs K, *et al.* Cognitive and neuroimaging findings in developmental coordination disorder: new insights from a systematic review of recent research. *Dev Med Child Neurol* 2017 ; 59 : 1117-29.

Wolpert DM, Ghahramani Z. Computational principles of movement neuroscience. *Nat Neurosci* 2000 ; 3 : 1212-7.

Wolpert DM, Miall RC. Forward models for physiological motor control. *Neural Netw* 1996 ; 9 : 1265-79.

Wolpert DM, Miall RC, Kawato M. Internal models in the cerebellum. *Trends Cogn Sci* 1998 ; 2 : 338-47.

Zoia S, Pelamatti G, Cuttini M, *et al.* Performance of gesture in children with and without DCD: effects of sensory input modalities. *Dev Med Child Neurol* 2002 ; 44 : 699-705.

Zwicker JG, Missiuna C, Boyd LA. Neural correlates of developmental coordination disorder: a review of hypotheses. *J Child Neurol* 2009 ; 24 : 1273-81.

Zwicker JG, Missiuna C, Harris SR, *et al.* Developmental coordination disorder: a review and update. *Eur J Paediatr Neurol* 2012 ; 16 : 573-81.