



**HAL**  
open science

# Déterminants des capacités fonctionnelles d'équilibration d'enfants présentant une Paralysie Cérébrale de type spastique

Audrey Fontaine

► **To cite this version:**

Audrey Fontaine. Déterminants des capacités fonctionnelles d'équilibration d'enfants présentant une Paralysie Cérébrale de type spastique. Médecine humaine et pathologie. Sorbonne Université, 2023. Français. NNT : 2023SORUS708 . tel-04612048

**HAL Id: tel-04612048**

**<https://theses.hal.science/tel-04612048v1>**

Submitted on 14 Jun 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## Thèse de Doctorat de Sorbonne Université SIM (Sciences, Ingénierie, Médecine)

Ecole Doctorale n°391 - Sciences mécaniques, acoustique, électronique et robotique (SMAER)  
*Institut des Systèmes Intelligents et de robotique (ISIR), Equipe Agathe*

# Déterminants des capacités fonctionnelles d'équilibration d'enfants présentant une Paralyse Cérébrale de type spastique

Présentée et soutenue publiquement, le 30 juin 2023, par Audrey Fontaine

<b>M. Philippe Thoumie</b>	<i>Professeur des universités - praticien hospitalier Sorbonne Université SIM</i>	Directeur de thèse
<b>Mme Christine Assaïante</b>	<i>Directrice de recherche Aix-Marseille Université</i>	Présidente du jury
<b>M. Sylvain Brochard</b>	<i>Professeur des universités - praticien hospitalier Université de Bretagne Occidentale</i>	Rapporteur
<b>M. Pierre Portero</b>	<i>Professeur des universités Université Paris Est Créteil</i>	Rapporteur
<b>Mme Pauline Lallemand-Dudeck</b>	<i>Praticienne Hospitalière Universitaire Sorbonne Université SIM</i>	Examineur
<b>Mme Catherine Achard</b>	<i>Professeure des universités Sorbonne Université SIM</i>	Examineur
<b>M. Wael Bachta</b>	<i>Maître de conférences Sorbonne Université SIM</i>	Invité
<b>M. Michel Thétio</b>	<i>Médecin MPR</i>	Invité

*A Matthieu, Gaspard, Gaëlle, Anne, Agathe, Mila, Morgane, Gabriel, Sélen, Julien, Jessila, Sacha, Faniamé, Mila, Léa, Ethan, Milo, Isidor, Olivia, Philippine, Sofia, Martin, Elia...et vous tous qui me montrez chaque jour ce que sont détermination, résilience et joie de vivre. Vous faites de mon quotidien de kinésithérapeute une merveilleuse aventure !*

## Remerciements

Ces années de doctorat ont été une aventure riche en rebondissements, et je n'aurais jamais pu les traverser sans l'aide précieuse de nombreuses personnes. C'est donc avec beaucoup d'émotion que je souhaite remercier tous ceux qui m'ont accompagnée dans ce parcours universitaire.

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma plus grande gratitude à mon directeur de thèse. Pr Philippe Thoumie, merci de m'avoir fait confiance et de m'avoir accueillie en tant que doctorante. Merci Pour votre patience, votre bienveillance, vos conseils éclairés et votre soutien indéfectible tout au long de ce travail. Je remercie sincèrement Viviane Pasqui et Wael Bachta, qui ont co-encadré ce travail. Grâce à vous, cette thèse a été le fruit d'une collaboration avec l'ISIR et je ne peux que vous remercier pour votre disponibilité, votre pédagogie et votre rigueur scientifique qui ont forgé ce travail. Je remercie également chaleureusement les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce manuscrit. Pr Assaïante, un grand merci pour votre sympathie qui m'a portée sur les dernières semaines. j'admire énormément tous vos travaux et c'est un honneur pour moi que vous ayez été présidente de ce jury. Pr Protero et Dr Achard, merci pour vos précieux conseils, vos critiques constructives et vos encouragements constants au cours des points d'étapes de 1/3 et 2/3 thèses. Heureusement que vous m'avez aidée à recentrer le sujet car sinon j'y serais encore dans 10 ans. Pr Lallemand-Dudeck, merci pour votre regard clinique aiguisé, si important pour moi. Et enfin Pr Brochard, vous m'avez bcp appris dans ma façon d'aborder la rééducation avec mes petits patients au cours des dernières années. Merci de m'avoir souvent poussée à aller plus loin. J'espère continuer à croiser fréquemment votre route à la Fondation ou ailleurs, car vous êtes une grande source d'inspiration pour moi.

Cette thèse de Sciences présente un ancrage clinique solide grâce à l'accueil et au soutien sans faille de nombreux professionnels de l'UFAM des Hôpitaux de Saint-Maurice. Dr Thétio, la passion pour le soin des enfants présentant une PC c'est vous qui me l'avez transmise. La réflexion autour de l'analyse du mouvement, de la marche, le choix des appareillages, mais aussi et surtout la compréhension des réels besoins des enfants et de leurs familles, c'est aussi vous. Alors merci d'avoir si bien rempli ma valise, et d'être toujours là pour bien plus de choses que ma vie professionnelle. Chère Francisca, si cela te conviens, je te place dans le même panier que Dr Thétio, car tous les deux vous avez été mes mentors depuis mon arrivée à l'INR-C il y a 12 ans. Je mesure ma chance d'avoir bénéficié de votre grande expérience et expertise, et je suis infiniment reconnaissante des encouragements que vous m'avez toujours témoigné. Raph, je ne peux pas compter le nombre de fois où tu es venu m'aider pour les acquisitions, pour brancher un truc ou cliquer sur un machin. Sans parler des soirées Apéro Matlab pour traiter toutes ces données, et de ce travail commun sur les articles. Merci pour ton amitié et ton grand cœur. Je remercie également Mme Aval, Dr Cadilhac, Dr Le Fur, et Gaël pour leur soutien permanent afin mener à bien toutes les acquisitions auprès des patients. Enfin, je ne peux clore ce paragraphe sur les Hôpitaux de Saint-Maurice, sans adresser toute mon affection à mes anciennes collègues de l'INR-C : Isabelle, Emilie, Vanessa, Anne, Agnès, Myriam...c'est bien vous qui m'avez transmis le virus de la rééducation en neuro-pédiatrie, et auprès de qui j'ai appris que les progrès des enfants arrivent par les rires et les jeux.

Je souhaite aussi exprimer ma gratitude envers la Sorbonne Université et l'Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique, pour les ressources mises à disposition et le soutien logistique. Je dois particulièrement l'aboutissement de cette thèse aux bons conseils et aux encouragements des membres de l'équipe Agathe : Guillaume Morel, Jérôme Szewczyk, Ludovic Saint-Bauzel et Agnès Roby-Brami. Sans oublier David et Florian, codeurs et mécaniciens hors pairs dont le soutien technique a été

indispensable, et sans qui je n'aurais jamais pu dompter cette plateforme robotisée un tantinet capricieuse.

Passons à ma super équipe du Cabinet A Pas de Géants. Que dire à part que vous êtes des collègues en or massif ? Je suis tellement fière de ce cabinet que nous construisons tous ensemble, et si heureuse de vous retrouver chaque matin. Anne-Lyse et Clémence mes piliers depuis le début, Célia, Paula, Anaëlle, et enfin mes deux petits bonbons Julie et Sidonie : je vous remercie du fond du cœur de m'avoir permis de mener de front le cabinet et la fin de thèse, grâce à votre soutien, votre patience, votre compréhension, et votre bonne humeur à toute épreuve.

Ces années de doctorat ont aussi été l'occasion de nombreuses rencontres et collaborations professionnelles, ayant pour certaines débouché sur de belles amitiés. Je pense en premier lieu à mes collègues d'enseignements en IFMK, à Saint-Maurice, à l'APHP, à Fontainebleau. J'adore nos réflexions et nos discussions à refaire le monde de la kiné...et partager avec vous cette vie professionnelle à 100 à l'heure entre clinique, enseignement et recherche. Merci à l'équipe de l'ENKRE, et tout particulièrement à Claire Marsal, qui m'a guidée vers la passion de la rééducation neurologique quand j'étais étudiante en kinésithérapie, et à Michel Pillu qui a fait germer en moi cette petite graine du goût pour l'enseignement et la recherche. Merci à Sébastien, Romain, Yann, Tarek et Elodie pour tous les bons moments partagés, et de m'avoir montré le chemin vers le doctorat.

Enfin, je tiens également à exprimer mes remerciements aux membres de la Fondation Paralysie Cérébrale, qui m'ont emmenée avec eux dans l'aventure passionnante et dynamisante de l'Enquête Espace, du Livre Blanc, des Recommandations de Bonnes Pratiques. Aussi, intégrer il y a quelques années le Conseil Scientifique m'a permis de côtoyer des professionnels de santé de renom, brillants et engagés, qui m'inspirent au quotidien. Alain, Clara, Nathalie, Geneviève, Matthieu, merci beaucoup pour votre présence et votre grande sympathie. Toujours du côté associatif, la création et la gestion du GI pédiatrie au sein de la Société Française de Physiothérapie a été un beau challenge, que je ne me serais vue partager avec personne d'autre que toi ma Louison. D'autres membres de la SFP m'ont apporté un soutien indéfectible sur les derniers mois les plus difficiles du doctorat, en particulier lors de la retraite rédactionnelle. Johanna, Matthieu et Thomas, votre coaching a été décisif pour me donner l'énergie nécessaire à la finalisation de ce manuscrit, et lorsque je plante des tomates dans mon jardin, je pense à vous avec émotion.

Pendant ces années de doctorat, il y avait aussi mes amies de toujours, mes chamettes chéries : Mathildou, Sole, Raph, May, Maud et Laura. Sans oublier Louisa, Alice, et les kinettes toujours prêtes à faire la fête, avec une pensée particulière pour toi ma Chloé qui m'a aidée à écrire les dernières lignes. Merci à toutes pour votre amitié si précieuse et les supers souvenirs ensemble accumulés depuis tant d'années. Et ma Fonfon bien sûre, ma meilleure amie, que j'aime comme une sœur. Tu joues un grand rôle dans tout ce que je vis et entreprends, merci infiniment d'être toujours là pour écouter, discuter, rigoler, voyager, et partager aussi bien les apéros carottes que les étapes les plus importantes de nos vies. Je tiens à adresser mes plus sincères remerciements à ma famille. Anne, Didier, Matthieu, Tata Fabie, Arnaud et Cédric. Vous n'êtes pas nombreux mais vous êtes là, toujours, quoi qu'il arrive, alors merci pour votre amour et votre soutien indéfectible. Une pensée pour ma Maman et pour mes grands-parents qui m'ont élevée comme leur propre fille, à qui je dois tant aujourd'hui. Je ne saurais oublier d'adresser ici toute mon affection à ma famille d'adoption : Magali, Yoran et Silas.

Pendant ces années doctorat mon Floflo d'amour, nous avons trouvé le temps de vivre une trépidante vie parisienne, de faire de beaux voyages, puis de nous marier entourés de nos proches, de nous installer dans notre petite maison en briques, de lui faire un sacré lifting, et de devenir parents pour notre plus grand bonheur. Au cours de cette thèse tu as été là à toutes les étapes : codeur Matlab, coach, relecteur, et j'en passe. Mais tu es aussi et surtout le meilleur des maris et co-équipiers, et le

plus génial des papas. Je t'aime pour la vie, et j'ai hâte de voir ce que la suite nous réserve ! Et à toi ma Lou. Tu es arrivée il y a presque deux ans et tu as transformé ma vie de la manière la plus magique qu'il soit. Tu es une petite fille au caractère déjà bien affirmé, pétillante, rigolote, plein de gentillesse et d'empathie. Si tu savais comme c'était difficile, tous ces mois à rogner le précieux temps avec toi pour terminer cette thèse...Et bien ça y est, maman a fini son gros travail. On va aller au parc sans se presser, on va faire du manège jusqu'à la fermeture, on va dire bonjour à tous les escargots du jardin, on va jouer aux Duplos pendant des heures, on va lire autant de « P'tits loups » que tu voudras le soir...on va vraiment prendre le temps de vivre. Je t'aime jusqu'aux étoiles et je suis infiniment fière de la merveilleuse petite personne que tu deviens.

Pour conclure, cette thèse ne serait rien sans tous les enfants qui ont été évalués dans le cadre de ce travail. Merci du fond du cœur aux familles qui ont accepté de donner de leur temps pour participer à cette étude. Ce manuscrit est le fruit d'un effort collectif, et je suis honoré de partager cette réussite avec vous tous.

## Résumé

**Titre :** Déterminants des capacités fonctionnelles d'équilibration d'enfants présentant une Paralyse Cérébrale de type spastique

**Mots clés :** Paralyse cérébrale, Equilibre fonctionnel, Spasticité, Enfants, Posturographie, Plateforme robotisée

**Résumé :** Les enfants avec Paralyse Cérébrale de type spastique, présentent des troubles du contrôle postural et de la fonction d'équilibration, qui limitent leurs activités quotidiennes et leur participation sociale. Cette thèse, constituée de trois études cliniques menées sur une population d'enfants avec PC spastique de 5 à 12 ans, vise à identifier les facteurs déterminants de leurs capacités fonctionnelles d'équilibration. Pour ce faire, le critère de jugement principal utilisé est la Pediatric Balance Scale. L'évaluation de la fonction d'équilibration est complexe et nécessite l'examen des interactions entre le système sensoriel, le système nerveux central et le système musculo-squelettique. Les résultats de cette recherche contribuent à mieux cerner les interactions entre maturation de la fonction neuro-motrice de l'enfant au développement typique, contrôle postural, et PC spastique.

## Abstract

**Title:** Determinants of functional balance capacity in children with spastic Cerebral Palsy

**Keywords :** Cerebral Palsy, Functional balance, Spasticity, Children, Posturography, Robotic platform

**Abstract:** Children with spastic cerebral palsy (CP) experience impairments in postural control and balance function, which limit their daily activities and social participation. This thesis, consisting of three clinical studies conducted on a population of children with spastic CP aged 5 to 12 years, aims to identify the determining factors of their functional balance abilities. The primary outcome measure used is the Pediatric Balance Scale. Evaluating balance function is complex and requires examination of the interactions between the sensory system, central nervous system, and musculoskeletal system. The findings of this research contribute to a better understanding of the interactions between neuro-motor function maturation in typically developing children, postural control, and spastic CP.

## Liste des abréviations

### En Français

AP : Antéro-Postérieur  
APA : Ajustement Postural Anticipé  
APA : Activité Physique Adaptée  
AVC : Accident Vasculaire Cérébral  
AVQ : Activités de la Vie Quotidienne  
BFBA: Basse Fréquence Basse Amplitude  
BFHA : Basse Fréquence Haute Amplitude  
BoTx-A : Toxine Botulinique de type A  
CdG : Centre de Gravité  
CdM : Centre de Masse  
CdP : Centre de Pression  
CIF : Classification Internationale du Fonctionnement, du Handicap et de la Santé  
CIF-EA : CIF, version Enfants et Adolescents  
D : Droit  
DDL : Degré De Liberté  
DT : Développement Typique  
EMFG : Evaluation Motrice Fonctionnelle Globale  
EMG : Electromyographie  
ERE : Echec Réaction d'Equilibration  
G : Gauche  
HAS : Haute Autorité de Santé  
HFBA : Haute Fréquence Basse Amplitude  
HFHA : Haute Fréquence Haute Amplitude  
M : Mousse  
MI : Membre Inférieur  
ML : Médio-Latéral  
MRU : Mouvement Rectiligne Uniforme  
OMS : Organisation Mondiale de la Santé  
PC : Paralysie Cérébrale  
PST : Paramètres Spatio-Temporels  
QDV : Qualité de Vie  
Rx, Ry, Rz : Rotation suivant l'axe x, y, z  
SNC : Système Nerveux Central  
TND : Trouble du Neuro-Développement  
Tx, Ty : Translation suivant l'axe x, y  
V1: Mobilisation articulaire à vitesse lente  
V3 : Mobilisation articulaire à vitesse rapide  
YF : Yeux Fermés  
YO : Yeux Ouverts

### En Anglais

CFCS: Communication Function Classification System  
EDACS: Eating and Drinking Ability Classification System  
GMFCS : Gross Motor Function Classification System  
GMFM : Gross Motor Function Measure  
HFLA: High Frequency Low Amplitude  
HFHA: High Frequency High Amplitude  
LFLA: Low Frequency Low Amplitude  
LFHA: Low Frequency High Amplitude  
LL: Lower limbs  
MACS: Manual Ability Classification System  
MAS: Modified Ashworth Scale  
MCID: Minimally Clinically Important Difference  
MDC: Minimal Detectable Change  
PBS: Pediatric Balance Scale  
RMS : Root Mean Square  
SCPE: Surveillance of Cerebral Palsy in Europe  
SLS : Single Leg Stance  
SOT : Sensory Organization Test  
TD: Typical Development  
WHO: World Health Organization



# Table des matières

<b>Remerciements</b> .....	<b>1</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>4</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>4</b>
<b>Liste des abréviations</b> .....	<b>4</b>
<b>Table des matières</b> .....	<b>4</b>
<b>Préambule</b> .....	<b>1</b>
<b>1 Cadre théorique</b> .....	<b>4</b>
<b>1.1 Notions clés sur la Paralyse Cérébrale</b> .....	<b>4</b>
1.1.1 Définition de la Paralyse Cérébrale .....	4
1.1.2 Epidémiologie de la Paralyse Cérébrale .....	4
1.1.2.1 Prévalence de la Paralyse Cérébrale .....	4
1.1.2.2 Facteurs de risque et étiologies de la Paralyse Cérébrale .....	6
1.1.3 Classifications de la Paralyse Cérébrale .....	7
1.1.4 <i>Des tableaux cliniques évolutifs de la naissance à l'âge adulte</i> .....	11
1.1.4.1 Troubles musculo-squelettiques secondaires .....	11
1.1.4.2 Prise en charge multi-disciplinaire des troubles neuro-moteurs d'enfants présentant une PC de type spastique .....	13
<b>1.2 Fonction d'équilibration et contrôle postural</b> .....	<b>20</b>
1.2.1 Définitions de l'équilibre, de la posture et du contrôle postural .....	20
1.2.1.1 Définitions de l'équilibre et de la posture .....	20
1.2.1.2 Applications à l'Humain .....	21
1.2.1.3 Le contrôle postural, socle du mouvement Humain .....	21
1.2.2 Bases neurophysiologiques du contrôle postural .....	22
1.2.2.1 Les afférences sensorielles .....	22
1.2.2.2 Intégration centrale du contrôle postural.....	26
1.2.2.3 Les effecteurs musculaires.....	28
<b>1.3 Développement et maturation de la fonction d'équilibration de la naissance à l'adolescence</b> .....	<b>34</b>
1.3.1 Bases neuro-physiologiques du développement posturo-moteur au cours de la première année de vie	34
1.3.2 Maturation des trois grands systèmes impliqués dans la fonction d'équilibration, de la petite enfance à l'adolescence .....	38
1.3.2.1 Maturation des systèmes visuel, somato-sensoriel et vestibulaire.....	38
1.3.2.2 Maturation des processus centraux de la fonction d'équilibration au cours de l'ontogenèse	39
1.3.2.3 Croissance et maturation du système musculo-squelettique.....	41
<b>1.4 Causes des troubles de l'équilibre d'enfants présentant une Paralyse Cérébrale de type spastique</b>	<b>45</b>
1.4.1 Causes sensorielles des troubles de l'équilibre associés à la Paralyse Cérébrale de type spastique	45
1.4.2 Causes centrales des troubles de l'équilibre associés à la Paralyse Cérébrale de type spastique	45
1.4.3 Causes musculo-squelettiques des troubles de l'équilibre associés à la Paralyse Cérébrale de type spastique .....	47
1.4.3.1 <i>Troubles musculo-squelettiques secondaires associés à la PC spastique</i> .....	47
1.4.3.2 Modifications de l'alignement postural, de la forme et de la surface du polygone de sustentation	49
<b>1.5 Modalités d'évaluation de l'équilibre des enfants présentant une Paralyse Cérébrale</b>	<b>51</b>

1.5.1	Evaluation instrumentée de la fonction d'équilibration d'enfants présentant une Paralyse Cérébrale	51
1.5.2	Echelles cliniques d'évaluation de la fonction d'équilibration d'enfants présentant une Paralyse cérébrale de type spastique	55
<b>1.6</b>	<b>Résumé du cadre théorique</b>	<b>64</b>
<b>2</b>	<b>Problématique, hypothèses de recherche et méthodologie générale</b>	<b>65</b>
<b>2.1</b>	<b>Problématique et hypothèses de recherche</b>	<b>65</b>
<b>2.2</b>	<b>Méthodologie générale</b>	<b>67</b>
2.2.1	Considérations éthiques	67
2.2.2	Population d'étude	68
2.2.2.1	Modalités de recrutement	68
2.2.2.2	Critères d'inclusion, de non-inclusion et d'exclusion	68
2.2.2.3	Modalités d'information et de recueil de consentement éclairé	69
2.2.3	Modalités d'évaluation	70
2.2.3.1	Recueil de données cliniques	70
2.2.3.2	Evaluation clinique analytique : mesures anthropométriques, amplitudes articulaires et longueurs musculaires, spasticité aux membres inférieurs	70
2.2.3.3	Evaluation clinique fonctionnelle de la fonction d'équilibration par la Pediatric Balance Scale	74
2.2.3.4	Evaluation posturographique de la fonction d'équilibration, en conditions statique et dynamique	75
<b>3</b>	<b>Cadre expérimental</b>	<b>88</b>
<b>3.1</b>	<b>Etude 1 : La spasticité mesurée aux muscles des membres inférieurs d'enfants présentant une Paralyse Cérébrale est-elle un déterminant de leurs capacités fonctionnelles d'équilibration ?</b>	<b>88</b>
<b>3.2</b>	<b>Etude 2 : Les paramètres posturographiques, évalués en conditions quasi-statique et dynamique, sont-ils des déterminants des capacités fonctionnelles d'équilibration d'enfants présentant une Paralyse Cérébrale de type spastique ?</b>	<b>102</b>
<b>3.3</b>	<b>Etude 3 : Les traitements neuro-orthopédiques dispensés aux enfants présentant une Paralyse Cérébrale de type spastique sont-ils des déterminants de leurs capacités fonctionnelles d'équilibration ?</b>	<b>125</b>
3.3.1	Introduction	125
3.3.2	Population, matériel et méthode	127
3.3.2.1	Population	127
3.3.2.2	Matériel	128
3.3.2.3	Méthode	128
3.3.3	Résultats	130
3.3.3.1	Pré/Post Injections de Toxine Botulinique de type A	130
3.3.3.2	Pré/Post Séries de bottes plâtrées d'allongements musculaire des triceps suraux	132
3.3.3.3	Pré/Post Injections de Toxine Botulinique de type A + Séries de bottes plâtrées d'allongements musculaire des triceps suraux	134
3.3.4	Discussion	136
3.3.4.1	Synthèse des résultats	136
3.3.4.2	Comparaison des résultats à la littérature	137
3.3.4.3	Limites des traitements neuro-orthopédiques aux triceps suraux et perspectives	139
3.3.5	Limites de l'étude	139
3.3.6	Conclusion et Perspectives	139
<b>3.4</b>	<b>Résumé du cadre expérimental</b>	<b>141</b>
<b>4</b>	<b>Discussion générale</b>	<b>142</b>
<b>4.1</b>	<b>L'apprentissage de la gestion des degrés de liberté articulaires</b>	<b>142</b>

<b>4.2</b>	<b>Intrications vicieuses et vertueuses entre les troubles de la fonction d'équilibration et la diminution des activités motrices globales.....</b>	<b>144</b>
4.2.1	Intrications vicieuses entre les troubles de la fonction d'équilibration et la diminution des activités motrices globales .....	144
4.2.2	Intrications vertueuses entre les troubles de la fonction d'équilibration et la diminution des activités motrices globales .....	145
<b>4.3</b>	<b>Implications cliniques .....</b>	<b>147</b>
<b>4.4</b>	<b>Perspectives de recherches.....</b>	<b>148</b>
4.4.1	Evaluation de l'impact de l'âge sur le PBS chez les enfants avec PC spastique.....	148
4.4.2	Ouverture du champ d'étude aux adolescents, aux adultes, et aux personnes avec paralysie cérébrale modérée à sévère (GMFCS III, IV, V) : .....	148
4.4.3	Diversification des technologies d'évaluation d'équilibration .....	148
4.4.4	Prise en compte de l'impact des fonctions supérieures sur les capacités d'équilibration.....	149
<b>5</b>	<b>Conclusion générale .....</b>	<b>150</b>
	<i>Bibliographie.....</i>	
	<i>Bibliographie personnelle, contributions et activités scientifiques .....</i>	

## Préambule

La Paralyse Cérébrale (PC) survient suite à une lésion précoce du cerveau en développement, que ce soit pendant la période fœtale, à la naissance ou au cours des deux premières années de vie du nourrisson. Celle-ci peut entraîner des troubles de la posture, de l'équilibre et de la motricité, donnant lieu à un handicap moteur dont la gravité varie en fonction de la localisation et de l'étendue de la lésion cérébrale. En France, environ quatre nouveau-nés sont touchés par la PC chaque jour, et on estime à 125 000 le nombre de personnes de tous âges ayant reçu ce diagnostic. La PC est la principale cause de handicap moteur durant l'enfance et elle impacte l'autonomie et la participation sociale des personnes touchées tout au long de leur vie. Elle représente donc une priorité de santé publique en termes de prévention, de rééducation et de réadaptation pour ces individus (Graham et al., 2016 ; Novak et al., 2020).

La position debout, bien qu'elle puisse sembler rudimentaire, requiert des mécanismes sophistiqués de contrôle postural, principalement réflexes et automatisés, chez l'être humain. Aussi, la maîtrise de l'équilibre en position debout bipodale constitue la base sur laquelle repose notre motricité, nos déplacements et notre capacité à réaliser nos activités quotidiennes. Ainsi, les troubles de la fonction d'équilibration observés chez les enfants atteints de PC ont un impact profond sur leur autonomie et leur participation aux activités familiales, scolaires et de loisirs.

Cependant, une analyse bibliométrique des publications internationales portant sur les enfants présentant une PC révèle un déséquilibre marqué dans l'évaluation et la rééducation de la fonction d'équilibration par rapport à la motricité et notamment la déambulation. En effet, l'examen de l'historique des études scientifiques internationales montre que les recherches antérieures à 1980 se concentrent principalement sur les mots clés "physiotherapy" et "botulinum toxin". À partir de 1980, les mots clés les plus fréquemment utilisés sont "gait", "gait analysis" et "spasticity". Par la suite, avec le développement de la Classification Internationale du Fonctionnement, du Handicap et de la Santé (CIF) et de l'approche bio-psycho-sociale du handicap qu'elle véhicule, une perspective plus fonctionnelle émerge progressivement. Ainsi, des mots clés tels que "quality of life", "physical therapy", "rehabilitation", "physical activity", "motor skills" et, dans une moindre mesure, "équilibre postural" et "équilibre" commencent à apparaître (Figure 1) (Danis et Kutluk, 2021). Étant donné que le contrôle de l'équilibre fournit une base stabilisée pour l'action, il est surprenant de constater que la fonction d'équilibration soit moins étudiée et évaluée que la déambulation. De plus, la littérature scientifique ne compte que peu d'études évaluant les capacités d'équilibration dans des conditions dynamiques, contrairement à celles évaluant les capacités d'équilibration dans des conditions quasi-statiques, peu représentative du contrôle postural en situation de vie réelle.

La période actuelle marque un tournant décisif dans le développement des soins destinés aux personnes avec PC en France. En 2017, la Fondation Paralyse Cérébrale a mené une enquête intitulée "Enquête de satisfaction des personnes diagnostiquées de paralyse cérébrale" (ESPaCe), qui a recueilli les réponses de près de 1000 familles d'enfants, adolescents et adultes avec PC. Cette enquête a conduit à la saisine de la Haute Autorité de Santé (HAS) et à la publication en 2021 de recommandations de bonnes pratiques concernant la "Rééducation et réadaptation de la fonction motrice de l'appareil locomoteur des personnes diagnostiquées de paralyse cérébrale".

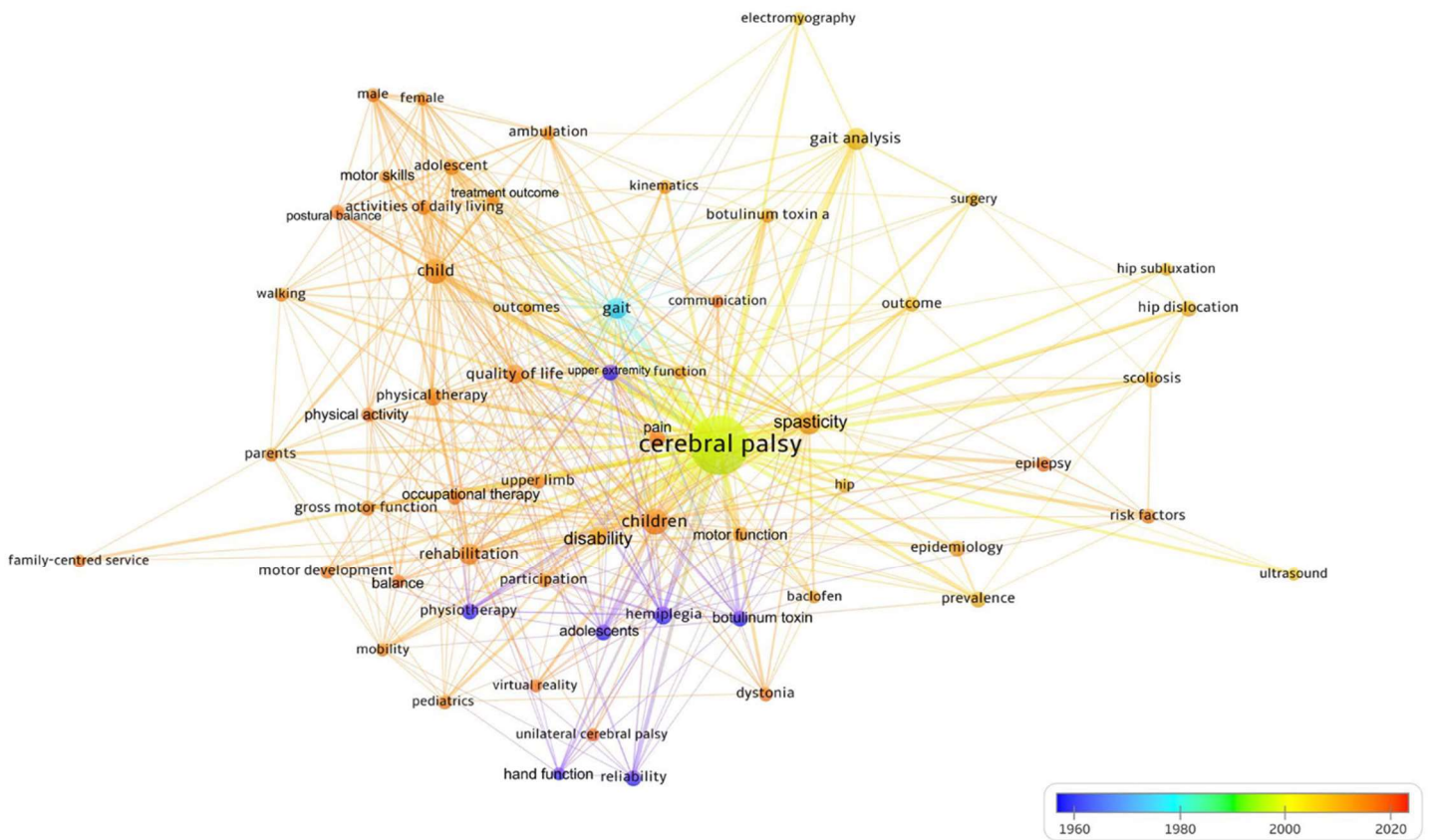


Figure 1 : Carte de visualisation des tendances d'utilisation des mots-clés dans les études scientifiques sur la PC, de 1960 à 2020. Le nombre d'utilisations de mots-clés augmente du bleu au rouge (bleu-vert-jaune-rouge). La taille des cercles renseigne sur la fréquence d'utilisation des mots-clés, l'épaisseur des traits sur la force de la relation (Danis et Kutluk 2021)

Il y a 12 ans, juste après avoir obtenu mon diplôme de kinésithérapeute, j'ai eu l'opportunité de découvrir le monde de la rééducation en neurologie pédiatrique, et plus particulièrement celui de la paralysie cérébrale. J'ai rejoint une équipe pluridisciplinaire exceptionnelle à l'INR-C des Hôpitaux de Saint-Maurice, qui m'a appris à considérer l'enfant en situation de handicap neuro-moteur dans toute sa complexité et sa singularité, dans le but de l'accompagner vers toujours plus de participation sociale. Dès lors, j'ai continué à exercer en tant que kinésithérapeute auprès de nourrissons, d'enfants, d'adolescents et d'adultes présentant une PC, que ce soit en centre de rééducation, en CAMSP, en SESSAD, et plus récemment, au sein d'un cabinet libéral pluridisciplinaire. Parallèlement à ma pratique clinique, j'ai eu l'opportunité d'effectuer un stage de recherche de master 2 à l'Unité Fonctionnelle d'Analyse du Mouvement des Hôpitaux de Saint-Maurice. Au cours de ce stage, je me suis intéressée à l'impact du port d'attelles suro-pédieuses de marche sur les paramètres spatio-temporels de la marche chez les enfants avec PC. Alors que j'accordais moi aussi une grande attention à la déambulation de ces enfants, j'ai peu à peu pris conscience de l'importance cruciale de l'équilibre pour leur autonomie dans les Activités de la Vie Quotidienne (AVQ). Je me souviens particulièrement d'une enfant qui, était capable de réaliser tous ses déplacements quotidiens en marchant à l'aide d'un déambulateur postérieur. Cependant, elle avait besoin de l'aide d'un adulte pour se rendre aux toilettes, car elle n'était pas en mesure de se tenir debout sans le soutien de ses membres supérieurs lorsqu'elle devait déboutonner et baisser son pantalon. En revanche, son amie du même âge se déplaçait principalement en fauteuil roulant manuel pour ses trajets quotidiens, mais elle était capable de faire quelques pas sans aide technique sur de très courtes distances, et pouvait se débrouiller seule aux toilettes sans l'aide d'un adulte. J'ai été frappée par le fait que la fillette la plus autonome dans la plupart des AVQ n'était pas celle qui se déplaçait en marchant mais bien celle qui se déplaçait en

fauteuil roulant. Ce qui les différenciait en grande partie était leurs capacités d'équilibration en position debout. C'est ainsi que le projet de thèse développé dans ce manuscrit a commencé à germer.

En tant qu'enseignante, en formation initiale et en formation continue, dans les domaines de la rééducation en neurologie centrale et en pédiatrie, j'ai pu observer de près l'évolution rapide des études et de la profession de kinésithérapeute au cours des dernières années. Depuis une dizaine d'années. Initialement, j'ai dispensé des cours dans le cadre de la formation initiale. Depuis 2015, les études de kinésithérapie se sont universitarisées, ce qui a entraîné une augmentation de la durée du cursus à 4 années d'études, précédées d'une année universitaire (le plus souvent la Première Année Commune aux Etudes de Santé). En 2019, cette évolution a conduit à la création d'une section 91 intitulée "Sciences de la rééducation/réadaptation" au sein du Conseil National des Universités. Enfin, en 2021, les étudiants diplômés d'État en kinésithérapie ont été officiellement reconnus avec le grade de Master. Grâce à cette intégration dans le système universitaire, les professionnels de la rééducation/réadaptation bénéficient d'une base solide pour la recherche sur le plan nationale et internationale, et ils jouent un rôle essentiel dans notre système de santé en offrant des soins de plus en plus spécialisés aux patients porteurs de handicap moteur.

C'est donc parée de ces deux casquettes de clinicienne et d'enseignante, qui j'espère rendront ce manuscrit didactique et en lien direct avec la vie quotidienne de mes petits patients, que j'ai entrepris ce parcours universitaire de doctorat. Enfin, j'ai le bonheur d'être maman d'une petite fille de bientôt deux ans. Elle me fait découvrir jour après jour à quel point le développement neuro-moteur peut émerger de façon spontanée, évidente, rapide et harmonieuse. Cette simplicité apparente du développement posturo-moteur m'émerveille d'autant plus que je réalise la complexité des mécanismes sensoriels, centraux, musculo-squelettiques et cognitifs, que nécessitent ces apprentissages.

Ce travail de thèse se compose de quatre grandes parties et a pour objectif principal d'évaluer les déterminants des capacités fonctionnelles d'équilibration chez les enfants âgés de 5 à 12 ans atteints de PC de type spastique. La première partie de la thèse consiste en une revue de la littérature portant sur les concepts clés de la PC, la physiologie de la fonction d'équilibration chez les enfants au développement typique et ceux présentant un PC de type spastique, ainsi que les méthodes d'évaluation des troubles de l'équilibre chez ces derniers. Cette revue de la littérature aboutit, dans la deuxième partie du manuscrit, à l'énoncé de la problématique de recherche et à la description de la méthodologie générale utilisée pour y répondre. La troisième partie expose les résultats des différentes études menées dans le cadre de cette thèse. Ces trois études examinent successivement les liens entre d'une part la spasticité, les paramètres posturographiques et les traitements neuro-orthopédiques et d'autre part les capacités fonctionnelles d'équilibration chez des enfants porteurs de PC de type spastique. Enfin, la quatrième partie de ce manuscrit de thèse est consacrée à la discussion générale, permettant de relier les résultats des trois études précédemment mentionnées et aboutissant à des implications cliniques en rééducation/réadaptation. La conclusion ouvre la voie à de nouvelles perspectives de recherche.

# 1 Cadre théorique

## 1.1 Notions clés sur la Paralyse Cérébrale

*“For me, cerebral palsy wasn’t the biggest deal, because I always had it. You know, you always work with what you got.” (Zach Anner)*

*“Is cerebral palsy progressive? Why do we ask?” (Peter Rosenbaum, 2022)*

### 1.1.1 Définition de la Paralyse Cérébrale

La première définition de la Paralyse Cérébrale (PC) a été proposée en 1861 par Little, sous les termes de « *Condition of spastic rigidity of the limbs of newborn children* » (Korzeniewski et al. 2018). Dès lors, celle-ci a évolué en raison du grand nombre de signes cliniques neurologiques et des troubles associés qui peuvent être observés et elle continue de se modifier avec notre compréhension de ce trouble complexe et des progrès diagnostics. En 2006, une définition consensuelle a été donnée par un panel d’experts internationaux : « La PC décrit un groupe de troubles permanents du développement du mouvement et de la posture, entraînant des limitations d’activité, qui sont attribués à des perturbations non progressives apparaissant pendant le développement fœtal ou du cerveau du nourrisson » (P. Rosenbaum et al. 2007; HAS 2021).

En 2017, de nouvelles recommandations internationales viennent préciser cette définition : « La PC est caractérisée par un trouble du développement moteur et de la posture causés par une lésion du cerveau du fœtus ou du nourrisson (avant l’âge de 2 ans) pouvant entraîner des limitations d’activité et des restrictions de participation. Les personnes atteintes peuvent également présenter des troubles associés : des épisodes épileptiques, des troubles cognitifs, visuels, auditifs, proprioceptifs, de la communication, de l’apprentissage, du comportement, de l’alimentation, urinaires, de la salivation, du sommeil et enfin des affections secondaires telles que des hypo-extensibilités musculaires, de l’arthrite dégénérative et des déformations orthopédiques secondaires. » (National Guideline Alliance (UK) 2017; HAS 2021; Dan 2022).

### 1.1.2 Epidémiologie de la Paralyse Cérébrale

#### 1.1.2.1 Prévalence de la Paralyse Cérébrale

La PC englobe un large éventail de troubles neurologiques et représente la première cause de handicap moteur pendant l’enfance (D. Graham, Paget, et Wimalasundera 2019; Novak et al. 2020). Au travers de différents programmes de surveillance internationaux, les estimations de la prévalence globale de la PC varient de 1,5 à 4 pour 1 000 naissances vivantes, avec une variation importante de l’incidence en fonction du développement socio-économique du pays considéré (Colver, Fairhurst, et Pharoah 2014; Smithers-Sheedy et al. 2014; National Guideline Alliance (UK) 2017; D. R. Patel et al. 2020; HAS 2021; McIntyre et al. 2022).

Au cours des dernières décennies, des avancées scientifiques majeures sont apparues concernant le suivi médical de la grossesse et la prévention de la prématurité. De nouveaux protocoles de neuroprotection sont mis en place incluant l’administration anténatale de sulfate de magnésium ou l’utilisation des stéroïdes prénataux maternels, de meilleures techniques de ventilation chez les nouveau-nés prématurés et le recours à l’hypothermie thérapeutique pour les nourrissons en anoxie à la naissance (Jacobs *et al.*, 2013; Oddie, Tuffnell and McGuire, 2015; Graham, Paget and Wimalasundera, 2019; Badawi, McIntyre and Hunt, 2021). Aussi, des modalités novatrices de diagnostic, notamment avec l’observation des Mouvements Généraux, permettent la mise en place précoce de

soins, de rééducation et de réadaptation des nourrissons avec PC (HAS 2020; Seesahai et al. 2021; Gima et Nakamura 2022). En conséquence, l'incidence et la gravité du pronostic fonctionnel de la PC diminuent dans les pays industrialisés riches (D. Graham, Paget, et Wimalasundera 2019).

En effet en 2022, McIntyre et al. ont publié une revue systématique de la littérature rassemblant les données des registres de surveillance de la PC, incluant les naissances recensées depuis 1995 dans 27 pays des 5 continents (McIntyre et al. 2022). Alors qu'elle était stable depuis les années 70 (Colver, Fairhurst, et Pharoah 2014), cette revue de la littérature met en évidence la diminution significative de la prévalence à la naissance de la PC dans les pays industrialisés riches, en particulier en Europe, en Australie et au Japon (Figure 1.1-1) (McIntyre et al. 2022; Sellier et al. 2016; 2020; Touyama et al. 2016). La prévalence globale actuelle de paralysie cérébrale dans les pays à revenus élevés (High-income countries) est de 1,6 pour 1000 naissances vivantes. Aussi, les formes les plus graves de PC, sans capacités de déambulation et avec déficience intellectuelle concomitante sont de moins en moins fréquentes (Hollung et al. 2021). A l'inverse, la Chine connaît une hausse significative inquiétante de la prévalence de la PC sur les 30 dernières années (Yang et al. 2021).



Figure 1.1-1 : Tendances de l'évolution de la prévalence de la Paralysie Cérébrale à la naissance, dans les pays industrialisés riches (McIntyre et al. 2022)

Concernant les pays en voie de développement et d'après les données disponibles limitées, des taux nettement plus élevée de PC que dans les pays industrialisés riches sont signalés. En effet, la prévalence de la PC y est de 3,4 pour 1 000 naissance vivantes. De plus, ces chiffres sont certainement sous-estimés en raison d'un biais de survie (c'est-à-dire une mortalité élevée dans les premières années de vie donc avant le diagnostic de PC, et une mortalité élevée chez les nourrissons avec PC) et d'un dépistage limité des formes les moins sévères de PC (Kakooza-Mwesige et al. 2017; Chauhan et al. 2019; Khandaker et al. 2019; McIntyre et al. 2022). Cependant, les unités de soins intensifs néonataux se développent progressivement au sein de ces pays. Il en résulte une augmentation du nombre de survies de nourrissons médicalement fragiles nés à des âges gestationnels de plus en plus bas. Cela pourrait



entraîner un pic initial de prévalence de la PC (comme actuellement observé en Chine), tandis que le développement ultérieur des soins néonataux pourrait à nouveau réduire cette prévalence, comme on a pu l'observer sur les dernières années en Europe ou en Australie. Un défi pour tous dans les années à venir est de réussir à partager les connaissances et l'expérience entre pays afin de minimiser cette hausse inévitable, tout en adaptant les nouveaux protocoles aux réalités de terrain dans les différentes régions du monde (Faruk et al. 2020; McIntyre et al. 2022).

Par ailleurs, la prévalence de la PC est plus élevée chez les hommes que chez les femmes, avec des sexe-ratio allant de 1,1:1 à 1,5:1 (Van Naarden Braun et al. 2016; Yang et al. 2021; Hollung et al. 2021; HAS 2021).

### 1.1.2.2 Facteurs de risque et étiologies de la Paralysie Cérébrale

La prématurité (définie par une naissance avant 37 Semaines d'Aménorrhée) et le faible poids de naissance sont les principaux facteurs de risque de PC. D'autres facteurs de risque sont également décrits, comme des données de santé de la mère (l'âge, l'obésité, les désordres métaboliques, la Procréation Médicalement Assistée...), les grossesses multiples, mais aussi tout autre complication survenant au cours de la grossesse (problème d'implantation ou de fonctionnement du placenta, incompatibilité de groupe sanguin entre la mère et le fœtus, infection virale ou bactérienne de la mère...) ou de l'accouchement (décollement placentaire, anoxie néonatale, ictère sévère du nouveau-né, naissance post-terme...) (Colver, Fairhurst, et Pharoah 2014; Stavsky et al. 2017; Korzeniewski et al. 2018; Patel et al. 2020; Vitrikas, Dalton, et Breish 2020; Wang et al. 2021; McIntyre et al. 2022). Enfin, il semble également exister un effet synergique, c'est-à-dire que l'accumulation de facteurs de risques multiplierait le risque de développer une PC. Cependant, de nombreuses études épidémiologiques indiquent que la moitié des enfants qui développent une PC sont nés à terme sans aucun facteurs de risques identifiés (H. K. Graham et al. 2016; D. Graham, Paget, et Wimalasundera 2019; Korzeniewski et al. 2018; Vitrikas, Dalton, et Breish 2020).

Parmi les étiologies de la PC, on distingue les causes prénatales qui représentent entre 70 et 80% des cas de PC, les causes néonatales et les causes postnatales (H. K. Graham et al. 2016; Fromer et Belani 2018; D. Graham, Paget, et Wimalasundera 2019; Patel et al. 2020). Les hémorragies intracérébrales et les leucomalaciques périventriculaires sont les principales lésions retrouvées chez les enfants prématurés ayant développé une PC (D. Graham, Paget, et Wimalasundera 2019). Aussi, on pense maintenant que moins de 10 % de tous les cas sont dus à une hypoxie-ischémie aiguë péri-natale. Enfin, les causes les plus courantes de PC entre la naissance et l'âge de deux ans sont les lésions cérébrales traumatiques (chutes, accidents de la voie publique...), les anoxies (noyade...) ou encore les séquelles de méningite (Patel et al. 2020).

Par ailleurs, il est de plus en plus communément admis que des facteurs génétiques et épigénétiques contribuent à la PC. Des mutations dans des gènes uniques se sont avérées être associées à des formes ataxiques (KCNC3, ITPR1, SPTBN2) et spastiques (KANK1, ADD3, AP4M1) de PC et des variantes du nombre de copies génomiques ont été trouvées dans 20% des cas. Aussi, des séquences de gènes impliquées dans la thrombose et dans la réponse à une lésion cellulaire seraient également impliquées. Les connaissances dans ce domaine devraient se développer rapidement au cours de la prochaine décennie et offrir des voies potentielles de prévention de la survenue de PC (Korzeniewski et al. 2018; D. Graham, Paget, et Wimalasundera 2019; Rosello et al. 2021; Elliott et Guimond 2022).

### 1.1.3 Classifications de la Paralyse Cérébrale

La localisation, l'étendue et le moment de survenue de la lésion cérébrale à l'origine de la PC, déterminent des conséquences neuro-motrices plus ou moins lourdes pour la personne concernée. Celles-ci peuvent aller d'une discrète boiterie à la marche ou une difficulté de motricité fine au membre supérieur, à une restriction de mobilité majeure impliquant l'usage d'un fauteuil roulant et dans les cas les plus sévères d'un siège moulé pour pallier à l'incapacité de maintenir le tronc et/ou la tête contre pesanteur. Aussi, le tableau clinique neuro-moteur de la PC est le plus souvent complété par des troubles associés tels que des difficultés sensorielles, cognitives, de la communication et du comportement. Il paraît donc essentiel de disposer d'outils de description et de classification de la grande diversité des tableaux cliniques observés.

#### ✓ Classification selon la topographie de l'atteinte

Selon la Surveillance of Cerebral Palsy in Europe (SCPE), on distingue deux grandes catégories de topographie d'atteinte motrice dans la PC : les atteintes unilatérales (un côté du corps est totalement ou partiellement affecté) et les atteintes bilatérales (les deux côtés du corps sont totalement ou partiellement affectés) (Figure 1.1-2). La PC unilatérale inclut la monoparésie (le plus souvent un membre inférieur) et l'hémi-parésie. La PC bilatérale comprend la diparésie, la triparésie et la quadriparésie qui présentent la particularité d'impliquer de manière plus ou moins sévère la motricité du tronc et de la sphère cervico-oro-faciale (tenue de tête, déglutition, communication...) (Surveillance of Cerebral Palsy in Europe 2000; H. K. Graham et al. 2016; Patel et al. 2020).

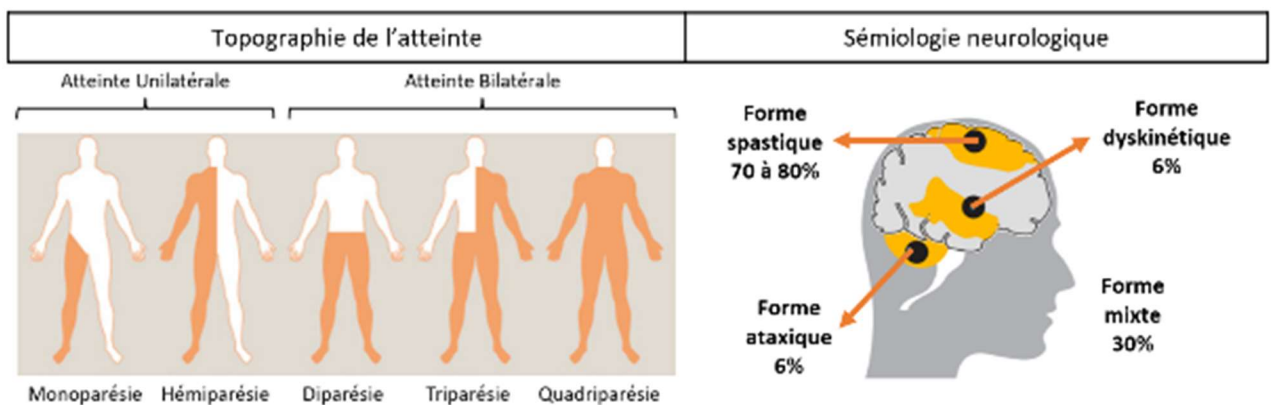


Figure 1.1-2 : Classifications de la Paralyse Cérébrale selon la topographie de l'atteinte et la sémiologie neurologique

#### ✓ Classification selon la sémiologie neurologique

La PC peut également être divisée en sous-types en fonction des signes neurologiques prédominants (Figure 1.1-2) (H. K. Graham et al. 2016; Novak et al. 2020; Patel et al. 2020):

- La forme spastique est la plus courante et représente environ 80 % des cas de PC. Elle résulte d'une atteinte de l'aire motrice primaire et se traduit par une hypertonie musculaire, une faiblesse musculaire et de la commande motrice.
- La forme dyskinétique représente 6 à 7% des cas de PC. Elle est caractérisée par des contractions musculaires involontaires entraînant des mouvements anormaux (involontaires, incontrôlés, récurrents, parfois stéréotypés) de type choréique, athétosique et dystonique. Elle résulte d'une atteinte des ganglions de la base.

- La forme ataxique représente elle aussi 6% des cas de PC. Elle est caractérisée par des difficultés de coordination des mouvements volontaires et aboutit à des troubles de la posture, de l'équilibre, de la déambulation et de la motricité fine, ou encore des difficultés d'élocution. Elle résulte d'une atteinte du cervelet.
- Enfin, 30 % des personnes avec PC présentent un tableau clinique dit mixte, combinant différents types de troubles de la fonction motrice.

✓ Classification selon les troubles associés

La PC s'accompagne dans la plupart des cas de troubles associés qui s'ajoutent au handicap neuro-moteur et peuvent considérablement impacter la santé, l'autonomie, la participation sociale et la qualité de vie de ces patients. Par ordre de fréquence, on retrouve la douleur chronique (75 %), les troubles cognitifs (49 %), l'épilepsie (35 %), les troubles musculo-squelettiques secondaires (28 %), les troubles du sommeil (23 %) (Figure 1.1-3) (Novak 2014; Patel et al. 2020). Les troubles de la communication sont également prépondérants, avec 55% des enfants avec PC qui présentent des difficultés à mener une discussion, et 19% à 32% qui ne sont pas du tout capables de parler (Pennington et al. 2020). Aussi, il a récemment été montré que l'autisme et le Trouble Déficitaire de l'Attention/Hyperactivité (TDAH) sont fréquents dans la population des enfants PC en âge scolaire (Gez et Berry 2021; Pålman, Gillberg, et Himmelmann 2021).

Moins fréquemment, on retrouve les troubles sensoriels (visuels, auditifs) les infections récurrentes des voies respiratoires, les troubles de l'alimentation et de la croissance, les troubles gastro-intestinaux (reflux gastro-œsophagien, constipation) et l'ostéoporose. Les troubles génito-sphinctériens, les troubles endocrinaux (puberté précoce ou tardive) (Novak 2014; Patel et al. 2020). Il est important de noter que la prévalence de ces troubles est corrélée au tableau clinique de PC : plus le score au GMFCS est élevé, plus la prévalence des troubles associés augmente (NICE, 2017; HAS, 2021).

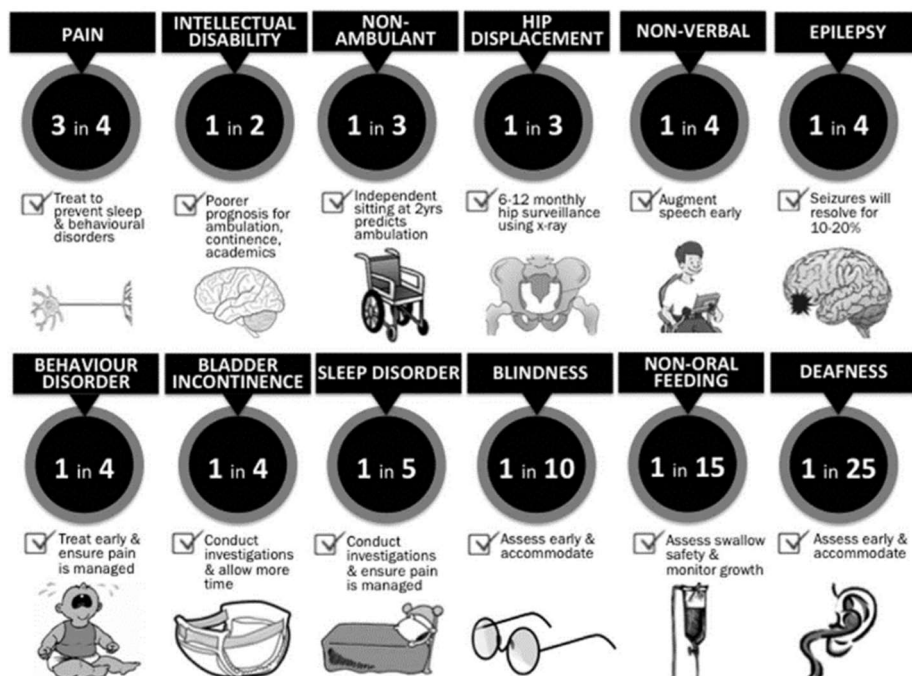


Figure 1.1-3 : Fréquence des troubles associés à la Paralysie Cérébrale (Novak 2014)

✓ Outils de classification selon les capacités posturales et motrices, manuelles, de communication et la capacité à manger et boire

La PC est traditionnellement décrite en fonction de la topographie de l'atteinte et de la sémiologie neurologique. Cependant, ces classifications sont sujettes à d'importantes variabilités inter et intra évaluateurs (H. K. Graham 2005; Eggink et al. 2017). Aussi, ces outils de description sont peu informatifs sur les capacités fonctionnelles d'une personne avec PC puisqu'un large éventail de capacités et de performances peut être englobé sous même terme. Par exemple, un enfant présentant une diparésie spastique peut tout autant avoir un périmètre de marche illimité, que ne pas être capable d'effectuer un transfert debout de manière autonome. Aussi, la spasticité ou encore la dystonie ne peuvent décrire à elles seules la complexité des troubles moteurs rencontrés par les enfants atteints de PC, ni leurs impacts sur la participation sociale et la qualité de vie (D. Graham, Paget, et Wimalasundera 2019).

Quatre outils de classification, présentant des qualités psychométriques robustes (classifications qui se sont avérées reproductibles, fiables et stables dans le temps) ont alors été développés afin de décrire les capacités fonctionnelles des enfants présentant une PC (D. J. Bartlett et al. 2016; Paulson et Vargus-Adams 2017; R. J. Palisano et al. 2018; Piscitelli et al. 2021). Ces 4 échelles sont bâties sur un système de classification ordinaire simple en cinq niveaux, destinés à représenter les capacités fonctionnelles au cours des AVQ d'enfants présentant une PC. La description des cinq niveaux pour ces quatre échelles est présentée dans le Tableau 1.1-1.

	<b>Gross Motor Function Classification System (GMFCS)</b>	<b>Manual Ability Classification System (MACS)</b>	<b>Communication Function Classification System (CFCs)</b>	<b>Eating and Drinking Ability Classification System (EDACS)</b>
I	Marche aussi bien en intérieur qu'en extérieur, sur tous types de terrains, avec un périmètre illimité. Capable de monter les escaliers sans aide des membres supérieurs. Capable de courir et de sauter, mais avec lenteur et éventuellement des troubles de l'équilibre et de la coordination.	Manipule les objets facilement et avec succès. Peut présenter des limitations dans l'aisance à exécuter des tâches manuelles qui requièrent de la vitesse et de l'exactitude. Pas de restriction d'autonomie dans les AVQ.	L'enfant est un émetteur et/ou récepteur efficace, aussi bien avec des partenaires inconnus que familiers.	Capable de manger et boire en toute sécurité et efficacement.
II	Marche aussi bien en intérieur qu'en extérieur, mais avec limitation du périmètre de marche. Peut présenter des difficultés d'équilibration sur certains terrains accidentés. Peut utiliser une aide humaine ou technique pour parcourir de longues distances. Monte et descend les escaliers en se tenant à la rampe. Incapacité ou capacité restreinte pour la course et les sauts.	Manipule la plupart des objets mais avec une diminution de la qualité et/ou vitesse d'exécution. Certaines tâches peuvent être évitées, achevées avec difficulté, ou en utilisant des stratégies de compensation. Pas de restriction d'autonomie dans les AVQ.	L'enfant est un émetteur et/ou récepteur efficace, aussi bien avec des partenaires inconnus que familiers, mais avec un rythme plus lent.	Capable de manger et boire en toute sécurité mais avec difficultés et lenteur.
III	Marche avec aide technique aussi bien en intérieur qu'en extérieur, sur de courtes distances. Monte et descend les escaliers avec aide des membres supérieurs et supervision/aide humaine. Utilisation autonome d'un fauteuil roulant manuel ou électrique pour les déplacements sur les longues distances.	Manipule la plupart des objets avec difficulté et a besoin d'aide pour préparer et/ou adapter la tâche à effectuer. La performance est lente et effectuée avec un succès limité en ce qui concerne la qualité et la quantité. Les plupart des AVQ sont exécutées de façon autonome si elles ont été préparées et/ou adaptées.	L'enfant est un émetteur et/ou un récepteur efficace, uniquement avec des partenaires familiers.	Capable de manger et boire avec des risques relatifs pour la sécurité (fausse route), avec difficultés et lenteur.

IV	Déplacements en fauteuil roulant manuel ou électrique dans la plupart des situations. Marche d'intérieur possible sur quelques pas avec une aide technique et/ou humaine adaptée.	Manipule une sélection limitée d'objets faciles à utiliser et dans des situations adaptées. Requiert un support continu et de l'assistance et/ou de l'équipement adapté, même pour une réalisation partielle de l'activité.	L'enfant est capable de comprendre/de se faire comprendre de manière aléatoire, uniquement avec des partenaires familiaux.	Capable de manger et boire avec des risques importants pour la sécurité (fausse route), avec difficultés et lenteur.
V	Incapacité à maintenir la posture de la tête et du tronc contre pesanteur, sans une installation adaptée. Tous les déplacements se font en fauteuil roulant, avec assistance totale d'une tierce personne.	Ne manipule pas les objets et a une habileté sévèrement limitée pour effectuer les gestes les plus simples. Requiert une assistante totale.	L'enfant est rarement capable de comprendre/de se faire comprendre, même avec des partenaires familiaux.	Incapable de manger et boire sans danger. Alimentation par sonde naso-gastrique ou gastrostomie.

Tableau 1.1-1 : Description des 5 niveaux de classification pour le GMFCS, le MACS, LE CFCS et l'EDACS, traduction et adaptation d'après (Paulson et Vargus-Adams 2017)

Tout d'abord, le Gross Motor Function Classification System (GMFCS) est une échelle validée chez le nourrisson, l'enfant et l'adolescent présentant une PC, créée pour décrire leur fonction motrice globale (Figure 1.1-4). Elle distingue cinq stades de sévérité des capacités de posture et de déplacement. Les GMF-CS I, les plus performants, sont capables de courir et de monter les escaliers sans aide des membres supérieurs. Les GMFCS V sont totalement dépendants de l'aide d'une tierce personne pour leurs déplacements et AVQ et présentent des difficultés pour maintenir leur tronc et leur tête contre pesanteur. Les distinctions entre les niveaux sont basées sur les capacités fonctionnelles et le besoin de technologie d'assistance (cannes, déambulateur, fauteuil roulant...) et non sur la qualité du mouvement effectué. Le GMFCS comprend des descripteurs distincts pour les cinq tranches d'âge suivantes : avant 2 ans, entre 2 et 4 ans, entre 4 et 6 ans, entre 6 et 12 ans et entre 12 et 18 ans. (R. Palisano et al. 1997; R. Palisano 2008; D. J. Bartlett et al. 2016; Paulson et Vargus-Adams 2017).



Figure 1.1-4 : GMF-CS pour les enfants de 6-12 ans (R. Palisano et al. 1997)

Concernant les habiletés motrices aux membres supérieurs, la Manual Ability Classification System (MACS) est validée pour des enfants avec PC de 4 à 18 ans. Elle évalue les performances manuelles lors des manipulations d'objets définis au cours des AVQ et dans son espace de vie, en prenant en compte l'utilisation de diverses adaptations susceptibles de faciliter l'usage des mains (Eliasson 2006; Paulson et Vargus-Adams 2017; Piscitelli et al. 2021).

Validée chez les enfants avec PC à partir de l'âge de 2 ans, la Communication Function Classification System (CFCS) évalue les capacités de communication dans la vie quotidienne, en prenant en considération toutes les méthodes de communication (la parole, les gestes, le regard, les expressions faciales, la communication augmentative et alternative). Être un communicateur efficace nécessite à la fois d'envoyer et de recevoir des informations, et le CFCS évalue à la fois la façon dont les informations sont « exprimées à » et reçues par » des partenaires de communication familiaux ou non familiaux (Caynes et al. 2019).

Enfin, la Eating and Drinking Ability Classification System (EDACS) évalue la capacité à manger et à boire en termes de sécurité (risque de fausse route et d'étouffement) et d'efficacité (quantité de nourriture perdue et temps mis pour manger). Elle est validée pour des enfants âgés de 3 ans et plus et présentant une PC (Benfer et al. 2017; Tschirren et al. 2018).

Ces quatre échelles sont standardisées et complémentaires les unes des autres. Elles affinent et simplifient la description des patients avec PC, posent un cadre de langage commun pour décrire les capacités fonctionnelles très hétérogènes de ces patients, permettent transmission rapide et précise de l'information d'un professionnel de santé à un autre, standardisent les populations pour la recherche clinique et facilitent l'application des résultats de la recherche à la pratique clinique (D. J. Bartlett et al. 2016; Paulson et Vargus-Adams 2017; R. J. Palisano et al. 2018; Piscitelli et al. 2021).

#### **1.1.4 Des tableaux cliniques évolutifs de la naissance à l'âge adulte**

Par ailleurs, bien que la lésion neurologique initiale ne soit pas évolutive, les enfants, adolescents et adultes présentant une PC, peuvent développer au cours du temps des troubles musculo-squelettiques secondaires, risquant de limiter leurs capacités fonctionnelles (H. K. Graham et al. 2021). A l'inverse, la plasticité cérébrale et l'apprentissage moteur, les traitements médicamenteux des troubles du tonus, la neuro-chirurgie ou la chirurgie orthopédique, la rééducation motrice, et la mise en place d'appareillages ou d'aides techniques, peuvent faire progresser au cours du temps leurs capacités fonctionnelles et leur participation sociale. Ainsi, chaque personne présentant une PC présente un tableau clinique unique et susceptible d'évoluer au cours du temps. Les outils de classification et de description de la pluralité des tableaux cliniques de la PC prennent alors tout leur sens.

##### **1.1.4.1 Troubles musculo-squelettiques secondaires**

Comme établi dans la définition de la PC, la lésion cérébrale néonatale initiale est stable. Cependant, les troubles neuro-moteurs associés à la PC de type spastique, engendrent avec la croissance et la prise de poids des enfants et adolescents, l'apparition de troubles musculo-squelettiques dits secondaires. Ceux-ci peuvent entraîner une dégradation de leurs capacités fonctionnelles dans diverses activités motrices telles que les transferts, les déplacements ou encore les AVQ, et ainsi impacter leur participation sociale (Patel et al. 2020; H. K. Graham et al. 2021). Le « National Institute for Health and Care Excellence » et la Haute autorité de Santé (HAS) décrivent la chronologie suivante (NICE, 2017; HAS, 2021):

1. Les anomalies primaires sont directement causées par la lésion cérébrale précoce. Dans le cadre d'un syndrome pyramidal, on observe : une faiblesse musculaire, des troubles du tonus de type hypertonie spastique et des troubles de la commande musculaire.
2. Les anomalies secondaires sont les conséquences de la lésion cérébrale précoce sur le système musculo-squelettique en développement. En 2021, Graham et al. proposent une classification supplémentaire en quatre stades au sein des anomalies secondaires, permettant de décrire la pathologie musculo-squelettique des membres inférieurs pour les enfants déambulant avec PC de type spastique (H. K. Graham et al. 2021).
  - Stade 1 de la naissance jusqu'à 4-6 ans : Hypertonie spastique. Les postures anormales sont dynamiques. Par exemple équin dynamique en station debout et lors de la déambulation, sans perte de longueur musculaire du triceps sural lors de l'examen clinique passif allongé.
  - Stade 2 de 4 à 12 ans : Rétractions musculo-tendineuses. Apparition progressive d'hypo-extensibilités musculaires, liées à une inadéquation entre la croissance des os longs et l'allongement des unités muscle-tendon.

- Stade 3 de 4 à 12 ans : Déformations osseuses et articulaires. En parallèle de l'installation des rétractions musculo-tendineuses peuvent apparaître des vices architecturaux osseux (anomalies de la statique rachidienne, dysplasie de hanche, subluxation de hanche, excès d'antéversion fémorale, excès de torsion tibiale interne, valgus/varus des genoux ou des arrières pieds, cassure du médio-pied....) et des pertes d'amplitudes articulaires (flexum de hanches/genoux/coudes, équins fixés...).
  - Stade 4 de 10 ans à l'âge adulte : Décompensation. La pathologie musculo-squelettique sévère et la restauration d'une fonction articulaire et musculo-tendineuse optimale n'est plus possible, en général après la poussée de croissance pubertaire. On pense en particulier à une marche en *crouch gait*, qui s'accroît avec l'augmentation des flexions de hanches et genoux, et qui devient de plus en plus coûteuse en énergie jusqu'à la perte des capacités de déambulation.
3. Les anomalies tertiaires comprennent les compensations mises en place afin de maintenir au mieux les capacités motrices et fonctionnelles malgré les troubles primaires et secondaires. Il peut s'agir par exemple de boîtiers de type fauchage ou encore *vaulting*.

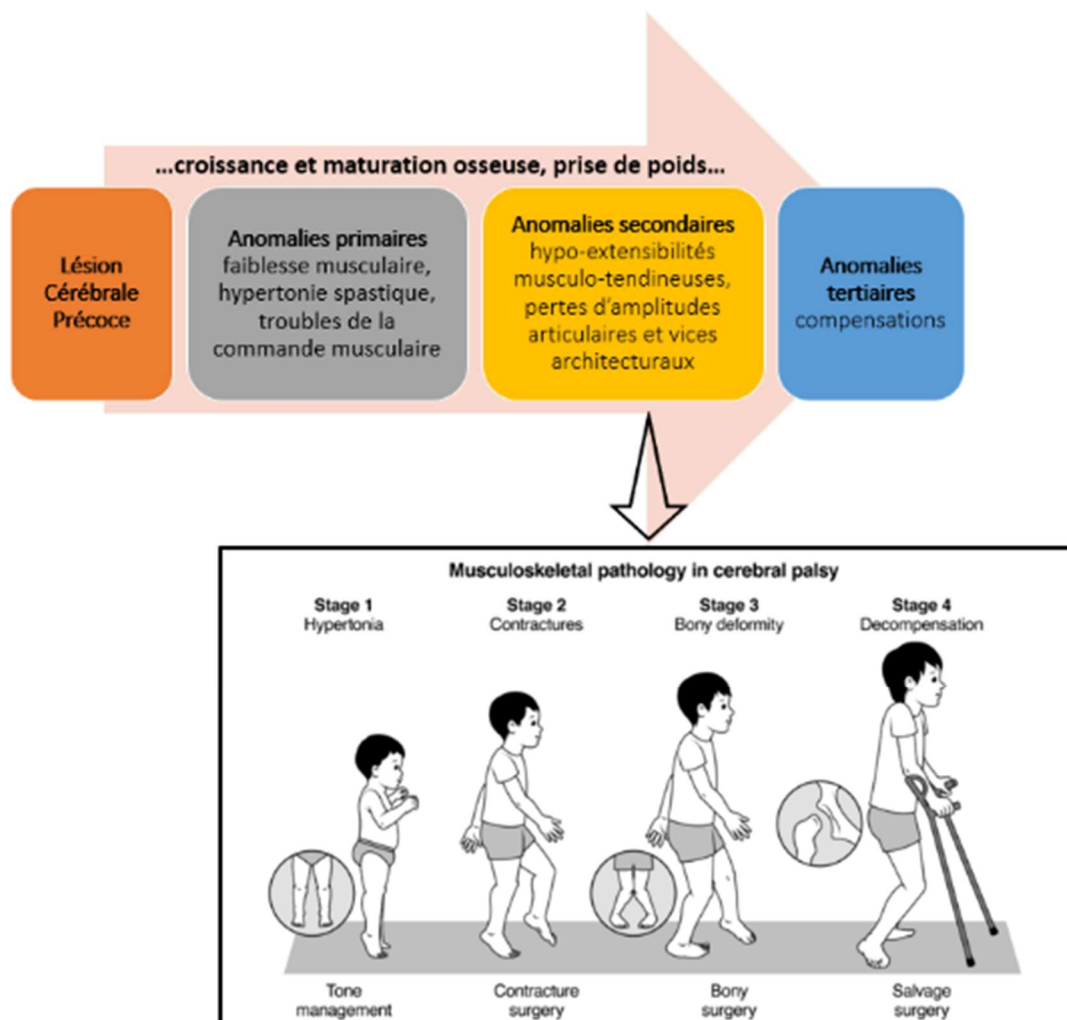


Figure 1.1-5 : Pathologie musculosquelettique secondaire associée à la Paralyse Cérébrale (D. R. Patel et al. 2020; H. K. Graham et al. 2021; HAS 2021)

Dans ces conditions, il semble difficile de rester optimistes quant au devenir de ces enfants en termes d'autonomie fonctionnelle, de Qualité De Vie (QDV) et de participation sociale. Mais cela est sans compter sur la détermination de ces enfants et de leurs familles à repousser leurs limites, à apprendre et à compenser. Sans compter également sur les importantes avancées récentes de la recherche en termes de prévention primaire, de diagnostic précoce, de prises en charge des troubles du tonus, et de rééducation neuro-motrice qui viennent réécrire l'histoire naturelle de la PC. En effet aujourd'hui, avec des interventions médicales, rééducatives et réadaptatives adaptées, 3 personnes avec PC sur 4 sont capables de déambuler avec ou sans aide technique (Novak et al. 2020).

#### 1.1.4.2 Prise en charge multi-disciplinaire des troubles neuro-moteurs d'enfants présentant une PC de type spastique

La prise en charge multidisciplinaire des troubles neuro-moteurs d'enfants présentant une PC spastique implique :

- ⇒ L'enfant et l'ensemble de son environnement bio-psycho-social. C'est-à-dire ses proches/famille/amis, les professionnels de la petite enfance et de l'enfance qui l'accompagnent, l'Ecole au sens large du terme, son lieu de vie, ses activités sportives et de loisirs, mais aussi ses capacités d'adaptation, ses émotions et ses croyances.

Le 21e siècle marque un changement radical dans notre réflexion sur le Handicap, et également sur le handicap de l'enfant. A partir des réflexions menées au travers de la Classification Internationale du Fonctionnement, du handicap et de la santé (CIF) de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), les concepts biomédicaux traditionnels sont élargis à tous les aspects bio-psycho-sociaux de la vie des enfants en situation de handicap neuro-moteur (Schiariti et al. 2018). Le modèle des « 6 F-Words », proposé par Rosenbaum et al. permet à chacun de se rappeler que l'enfant avec PC est avant tout un enfant en développement, avec sa propre histoire, son entourage, ses loisirs, ses aspirations (P. Rosenbaum et Gorter 2012) (Figure 1.1-6) :

- « **Function** » : la manière dont un enfant exécute une activité motrice n'est pas importante, l'important est qu'il ait l'opportunité d'essayer.
- « **Family** » : les membres de sa famille sont ceux qui connaissent le mieux l'enfant et sont un soutien essentiel à la santé de l'enfant. Il est primordial de les écouter, de leur parler de les respecter..
- « **Fitness** » : pour rester en bonne santé, tous les enfants doivent être physiquement actifs, et ce quel que soit leur niveau de handicap.
- « **Friends** » : il est important pour chaque enfant d'avoir l'opportunité de se faire des amis, les interactions sociales faisant partie intégrante de son développement global.
- « **Fun** » : l'enfance est synonyme d'amusement et de plaisir. L'enfant apprend par le jeu et il incombe aux professionnels de santé de mettre en œuvre des activités qui l'amuse réellement.
- « **Future** » : chaque enfant PC deviendra grand. Tout doit être mis en œuvre pour les aider à développer leur indépendance et leur participation sociale.



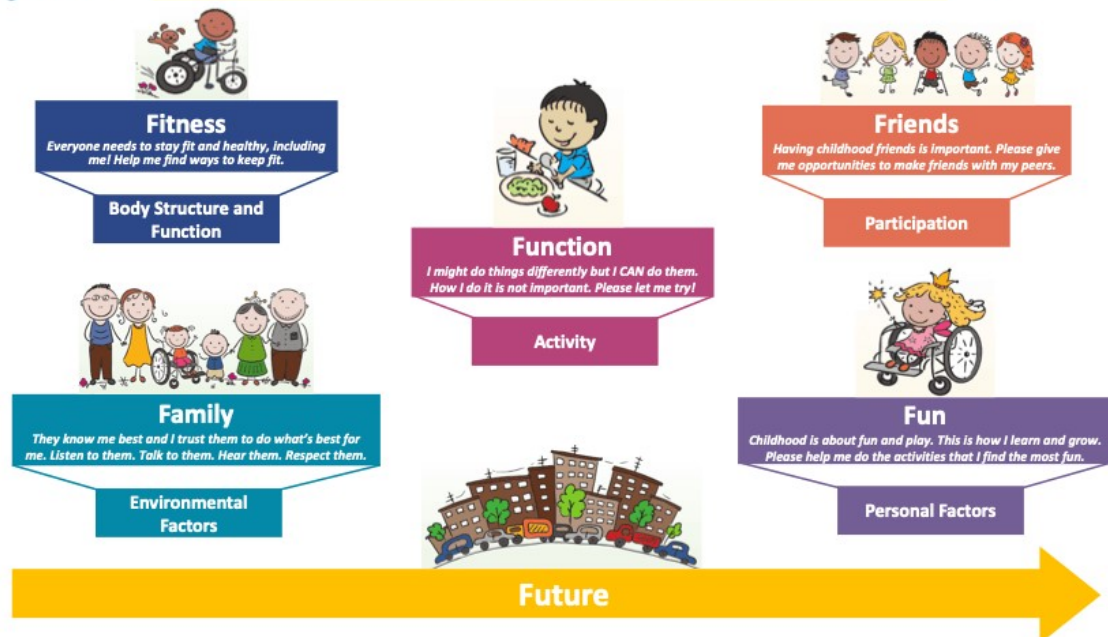


Figure 1.1-6: What is the International Classification of Function? Dr. Peter Rosenbaum  
<https://cpresource.org/topic/what-cerebral-palsy/what-international-classification-function>

⇒ Une équipe multidisciplinaire coordonnée de professionnels de rééducation et réadaptation, incluant des médecins (généraliste, pédiatre, neuro-pédiatre, MPR, neuro-chirurgien, chirurgien orthopédiste...), des rééducateurs (kinésithérapeutes, ergothérapeutes, psychomotriciens, orthoptistes...), des ingénieurs en analyse du mouvement, des orthoprothésistes...

Les enfants avec PC présentent des tableaux cliniques neuro-moteurs complexes et évoluant avec la croissance, accompagnés de nombreux troubles associés. Leur prise en charge nécessite donc une approche globale et coordonnée, au sein d'une équipe multidisciplinaire, afin de pouvoir les accompagner vers un maximum d'indépendance et de participation sociale (Schiariti, Mahdi, et Bölte 2018; Patel et al. 2020).

⇒ Qui coconstruisent des objectifs fonctionnels de rééducation de type SMART

**La section suivante est extraite d'une publication scientifique co-écrite par l'auteur de ce manuscrit de thèse, intitulée « Les recommandations de la HAS sur la réadaptation de la fonction motrice des personnes avec paralysie cérébrale : en route vers la co-détermination d'objectifs par le trio personne avec PC/aidant/kinésithérapeute » (Fontaine et al. 2023)**

« Dans ce cadre, un ou plusieurs professionnels proposent des actions thérapeutiques individualisées adaptées aux souhaits et aux besoins de chaque personne avec PC/aidant, selon des objectifs théoriquement fixés ensemble. Pour se faire, la co-détermination des objectifs est recommandée en pratique clinique de réadaptation. Il s'agit d'un élément central dans la pratique de réadaptation pour tous les professionnels de réadaptation : médecins et professionnels paramédicaux (Wade 2009; An et Palisano 2014; Novak 2020).

Un objectif est défini comme un état futur souhaité que l'enfant doit atteindre à la suite d'interventions de réadaptation (Wade 2009; Siegert et Levack 2014). Les objectifs formulés doivent idéalement répondre aux critères SMART : Spécifiques dans leur formulation, Mesurables pour permettre leur suivi et les ajuster si nécessaire, Attirants ou souhaitables par l'enfant et sa famille : centrés sur les limitations d'activités et restrictions de

participation impactant l'enfant dans son quotidien, Réalistes ou prenant en compte les changements possibles ou non, et définis dans le Temps (Siegert et Levack 2014; Bexelius, Carlberg, et Löwing 2018; Jackman et al. 2022).

Pour la mise en place des thérapies et pour assurer la motivation et l'engagement du patient et de ses proches/aidants tout au long de la prise en charge, la détermination récurrente d'objectifs de qualité est cruciale (Jackman et al. 2022). Cette détermination passe par un processus mené par le professionnel de réadaptation comprenant 3 étapes (Wade 2009; Pritchard-Wiart et Phelan 2018; Scobbie et al. 2021) : ● définir les souhaits et besoins du patient et de ses proches/aidants. Pour cela, le professionnel procède à un interrogatoire (King et al. 2004; Siegert et Levack 2014) durant lequel la prise en compte de l'avis et la considération de l'expertise du patient et de ses proches/aidants sont indispensables ;

- déterminer si les changements envisagés sont possibles ou non. Ceci passe par la réalisation d'évaluations standardisées permettant d'explorer l'ensemble des composantes de la CIF (Weltgesundheits organisation 2001), en fonction des nécessités des objectifs envisagés. Le professionnel établit ce qui est nécessaire pour atteindre chaque objectif, et évalue ainsi la probabilité du changement ;

- partager ces informations au sein du trio personne avec PC/aidant/kinésithérapeute et co-déterminer un ensemble d'objectifs, en prenant en compte les souhaits du patient et de ses proches/aidants, afin de résoudre autant de problèmes que possible.

En fonction des objectifs choisis, un plan d'action est établi et un processus itératif de documentation et de suivi des objectifs fixés est défini. L'évolution peut ainsi être évaluée, et les membres de l'équipe (un ou plusieurs professionnels de réadaptation et le patient) peuvent si nécessaire ajuster le plan d'action proposé. »

.....

#### 1.1.4.2.1 Plan d'action en 3 volets

Plusieurs interventions concomitantes sont souvent nécessaires pour répondre à un objectif fonctionnel fixé. Par exemple si l'objectif SMART est « Être capable de faire le trajet de la maison à l'école à pieds avant les grandes vacances », il peut être nécessaire d'envisager un traitement par toxine botulinique pour diminuer localement la spasticité qui entrave le schéma de marche, proposer des bottes plâtrées d'allongement musculaire, entreprendre une rééducation neuro-motrice basée sur la pratique de la marche, réfléchir à la confection d'attelles suro-pédieuses et à l'acquisition d'une aide technique spécifique qui pourrait permettre d'atteindre cet objectif. Cet exemple nous amène à décliner, comme proposé par Iona Novak, un plan d'action en 3 volets (Novak 2014; Novak et al. 2020).

⇒ 1er volet : Prise en charge médicale et chirurgicale de la spasticité et des troubles musculo-squelettiques secondaires

Plusieurs interventions thérapeutiques, ayant démontré leur efficacité dans la littérature scientifique internationale, sont disponibles pour le traitement de l'hypertonie chez les enfants avec PC (Nahm et al. 2018; Novak et al. 2020) (Figure 1.1-7). Le choix du traitement de l'hypertonie, discuté en équipe multidisciplinaire, est guidé par les capacités motrices de l'enfant et les objectifs fonctionnels co-construits avec la famille (D. Graham, Paget, et Wimalasundera 2019; Novak et al. 2020). On peut classer les différentes solutions thérapeutiques de traitement de la spasticité en fonction de leur champ d'action (spasticité locale ou globale), et de leur caractère réversible ou irréversible (Figure 1.1-8).

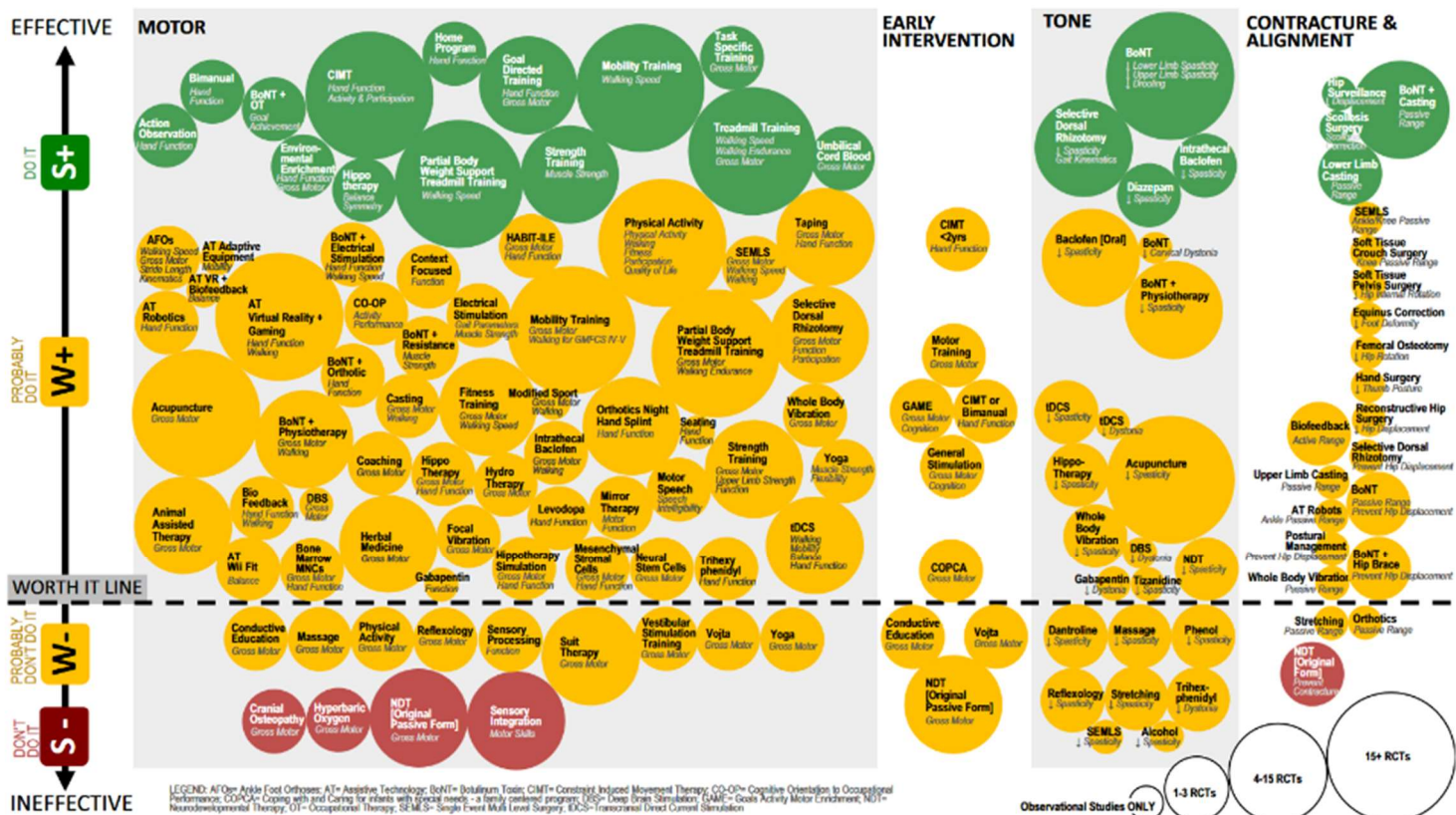


Figure 1.1-7: State of the Evidence Traffic Lights 2019: Systematic Review of Interventions for Preventing and Treating Children with Cerebral Palsy (Novak et al. 2020)

Les antispastiques oraux présentent une action globale sur le corps, avec les effets secondaires que cela implique, mais réversible puisque leurs effets disparaissent peu après l'arrêt de la prise des médicaments. La mise en place d'une pompe à Baclofène intrathécale, permet également de diminuer une spasticité diffuse, sans effets secondaires sur les fonctions supérieures, mais avec des contraintes liées à son installation et aux remplissages réguliers qu'elle nécessite (Buizer et al. 2019). Également envisagée dans les cas de spasticité globale, la Rhizotomie Dorsale Sélective est une technique de neurochirurgie complètement irréversible, mais dont les bons résultats fonctionnels sont désormais établis (D. Graham et al. 2016). Concernant le traitement localisé de la spasticité, si l'irréversibilité de la neurotomie périphérique sélective est évidente, le caractère réversible des injections intra-musculaires de Toxine Botulinique de type A (BoTx-A) est désormais remis en question (Kahraman et al. 2016) (Figure 1.1-8).

Malgré les thérapeutiques disponibles afin de limiter l'hypertonie, il reste nécessaire de prévenir et/ou retarder et/ou limiter l'installation et l'aggravation des troubles musculo-squelettiques secondaires. En effet, les rétractions musculo-tendineuses représentent une complication courante chez les enfants atteints de PC spastique. Avant que celles-ci ne se développent, puis pour ralentir leur évolution, il est recommandé de mettre en place des appareillages de posture de nuit (des membres et/ou du tronc). Le recours aux séries de bottes plâtrées d'allongement des triceps suraux s'avère efficace pour récupérer rapidement de la longueur musculaire (Blake et al. 2015; Novak et al. 2020; H. K. Graham et al. 2021; HAS 2021; Jackman et al. 2022; Paleg et Livingstone 2022). Lorsque des troubles musculo-squelettiques secondaires installés, altèrent la participation sociale et la QDV de l'enfant, la chirurgie orthopédique est discutée en équipe multidisciplinaire (Amirmudin et al. 2019; Novak et al. 2020; Patel et al. 2020).

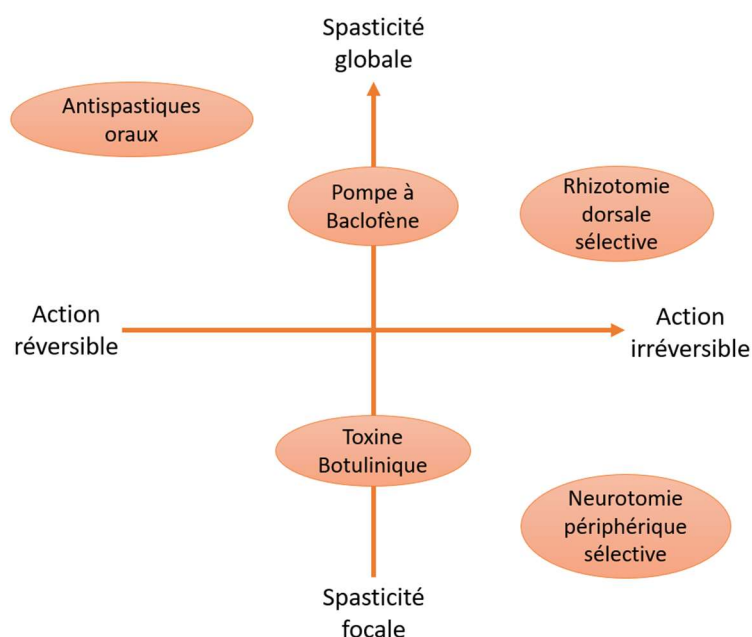


Figure 1.1-8 : Représentation schématisée des traitements pharmacologiques et chirurgicaux de la spasticité, en fonction de leurs modalités d'action

⇒ 2<sup>ème</sup> volet Rééducation et réadaptation fonctionnelle conventionnelle, programmes de rééducation et réadaptation intensive et Activités Physiques Adaptées

En 2021, la HAS a formulé des Recommandations de Bonnes Pratiques concernant la rééducation des personnes avec PC, plaçant le renforcement musculaire, l'entraînement à la marche, l'entraînement cardio-respiratoire à l'effort, et les programmes de rééducation neuro-motrice intensive bimanuels (HABIT) et incluant les 4 membres et le tronc (HABIT-ILE) comme prioritaires (Figure 1.1-9). Toutes ces interventions ont en commun les caractéristiques suivantes : la pratique de tâches ludiques et d'AVQ, utilisant des mouvements actifs, effectués à une intensité élevée, où la pratique vise directement l'atteinte d'un objectif fonctionnel co-déterminé entre avec l'enfant et sa famille. La motivation à effectuer la tâche et l'engagement de l'enfant sont des modulateurs essentiels de l'apprentissage et de la neuroplasticité (Kleim et Jones 2008; Novak et al. 2020).

Aussi, l'OMS a formulé en 2022 les recommandations suivantes concernant la pratique d'activité pour les enfants en situation de handicap : « devraient consacrer au moins 60 minutes par jour, en moyenne, à une activité physique d'intensité modérée à soutenue, principalement d'endurance, tout au long de la semaine ; devraient pratiquer au moins 3 fois par semaine des activités d'endurance d'intensité soutenue, ainsi que des activités qui renforcent le système musculaire et l'état osseux ; devraient limiter leur temps de sédentarité en particulier le temps de loisir passé devant un écran. » (<https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/physical-activity>). En effet, l'activité physique est essentielle pour tous, quel que soit l'âge ou le niveau de handicap moteur, afin d'améliorer la santé cardio-respiratoire, musculo-squelettique, psychologique, cognitive et sociale. Chez les enfants avec PC, en plus de ses impacts positifs sur la santé globale, elle permet d'améliorer la condition physique, la marche, la fonction motrice globale, la participation et qualité de vie (O'Brien et al. 2016; Verschuren et al. 2016; Bloemen et al. 2017; Reedman, Boyd, et Sakzewski 2017; Novak et al. 2020) (Figure 1.1-9). Différents obstacles peuvent restreindre la pratique d'une activité physique quotidienne, aussi simple

soit-elle que la déambulation, pour les enfants présentant un handicap neuro-moteur. Heureusement, il existe de nombreux appareillages, aides techniques et équipements adaptés qui permettent de pallier à ces difficultés.

Renforcement musculaire	B	Il est recommandé de proposer des exercices actifs de type renforcement musculaire tout au long de la vie et de manière pluri-hebdomadaire aux enfants et adolescents diagnostiqués de paralysie cérébrale dans le but de réduire la morbidité générale (métabolique, cardio-vasculaire, etc.) et la mortalité.
	B	Il est recommandé de proposer des exercices contre résistance combinés à la rééducation fonctionnelle conventionnelle dans le but d'améliorer la vitesse de marche des enfants diagnostiqués de paralysie cérébrale.
	AE	Le renforcement musculaire proposé en rééducation doit être constitué de mouvements orientés vers la tâche afin de pouvoir être transféré sur l'autonomie dans les activités de la vie quotidienne.
Entraînement à la marche	A	Il est recommandé de proposer des exercices de marche dans le but d'améliorer la fonction motrice globale des enfants et adolescents diagnostiqués de paralysie cérébrale en capacité de les réaliser.
	AE	Il est recommandé d'inclure dans la rééducation motrice des exercices de marche durant des trajets aussi longs que possible pour le patient, afin de développer son périmètre de marche, son endurance et de diminuer la fatigabilité en situation de marche écologique.
Entraînement cardio-respiratoire à l'effort	C	Il est recommandé de proposer des exercices aérobie dans le but d'améliorer la fonction motrice globale et les capacités cardio-vasculaires, à court et moyen termes, des enfants et adolescents diagnostiqués de paralysie cérébrale.
	AE	Il est recommandé de proposer à toute personne diagnostiquée de paralysie cérébrale, quels que soient son âge et l'importance des limitations physiques, un matériel adapté lui permettant d'accéder à un effort en endurance cardio-respiratoire.
Programmes de rééducation et réadaptation intensive	A	Il est recommandé de proposer un entraînement intensif bimanuel main-bras (HABIT) dans le but d'améliorer la fonction motrice des membres supérieurs, les capacités bimanuelles et la fonction d'autosoins des enfants et adolescents diagnostiqués de paralysie cérébrale bilatérale.
	B	Il est recommandé de proposer un entraînement intensif bimanuel main-bras incluant les membres inférieurs (HABIT-ILE) dans le but d'améliorer la fonction motrice des membres supérieurs, les capacités bimanuelles et la fonction d'autosoins des enfants et adolescents diagnostiqués de paralysie cérébrale unilatérale et bilatérale.
	B	Il est recommandé de proposer un programme de rééducation et réadaptation intensive incluant les principes de l'apprentissage moteur de 60 à 90 heures intégrant des interventions rééducatives ciblant spécifiquement des objectifs fonctionnels de la vie quotidienne en lien avec les troubles fonctionnels du membre supérieur des enfants de plus de 6 ans diagnostiqués de paralysie cérébrale unilatérale de type spastique.
	AE	Il est recommandé que l'ensemble de ces programmes de rééducation et réadaptation intensive soit intégré au projet global de l'enfant ou de l'adolescent et de sa famille et son entourage.

<b>Activités physiques adaptées</b>	<b>A</b>	Il est recommandé de proposer des activités physiques dans le but d'améliorer la fonction motrice globale des enfants et adolescents diagnostiqués de paralysie cérébrale.
	<b>B</b>	Il est recommandé de proposer des activités physiques associées à de la rééducation et réadaptation fonctionnelle conventionnelle dans le but d'améliorer la fonction motrice globale des enfants et adolescents diagnostiqués de paralysie cérébrale.  Il est recommandé de proposer des activités sportives dans le but d'améliorer la fonction motrice globale des enfants et adolescents diagnostiqués de paralysie cérébrale.

Figure 1.1-9 : Synthèse des Recommandations de bonnes pratiques émises par la HAS concernant la rééducation de la fonction motrice des personnes avec PC (HAS 2021)

⇒ 3<sup>ème</sup> volet Appareillages de fonction, aides techniques et équipements adaptés

Une importante variété d'appareillages de fonction, d'équipements adaptés et de dispositifs technologiques d'assistance permettent d'améliorer les capacités fonctionnelles de l'enfant avec PC et de promouvoir sa participation et son inclusion sociale. Encore une fois, leurs choix sont effectués en collaboration avec l'enfant et ses proches, en fonction des objectifs fonctionnels recherchés et du contexte bio-psycho-social global (Jackman et al. 2022).

Les appareillages de fonction sont aussi diversifiés que peuvent l'être les besoins des enfants avec PC, du GMF-CS I au GMF-CS V. On peut citer les appareillages d'aide à la station assise, d'aide à la station debout et à la déambulation, ou encore d'aide à la préhension. Ils sont confectionnés sur mesure afin de s'adapter aux besoins et aux spécificités musculo-squelettiques de chacun. Parmi les attelles sur-pédieuses d'aide à la déambulation, on observe également une diversité importante de modèles avec des propriétés biomécaniques propres afin de répondre aux troubles de la marche observés en fonction de la topographie de l'atteinte, de la sémiologie neurologique et du GMFCS (Lintanf et al. 2018; E. Wright et DiBello 2020).

Les aides techniques de transferts, de déplacements (fauteuil roulant manuel ou électrique) et de déambulation (cannes ou déambulateurs) font également partie intégrante du quotidien de la plupart des enfants avec PC. Enfin les équipements permettant d'adapter le cadre de vie (poignées, rampes d'accès, mobilier adapté) ou permettant d'accéder à diverses activités sportives et de loisirs (vélo adapté, tricycle, Motylo<sup>®</sup>, Dynamico<sup>®</sup>) et autre technologies d'assistance (outils de communication alternative ou augmentée, outils informatiques adaptés), représentent de puissants catalyseurs d'autonomie et d'auto-détermination (Novak et al. 2020; HAS 2021).

## 1.2 Fonction d'équilibration et contrôle postural

« Dans la vie, l'équilibre n'est pas important, l'équilibre est la vie. » (Maître Zen)

### 1.2.1 Définitions de l'équilibre, de la posture et du contrôle postural

#### 1.2.1.1 Définitions de l'équilibre et de la posture

Enoncée en 1687 par Newton dans son ouvrage *Philosophiæ naturalis principia mathematica*, la première loi du mouvement, ou principe d'inertie, a ainsi été originellement formulée : « Tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite dans lequel il se trouve, à moins que quelque force n'agisse sur lui, et ne le contraigne à changer d'état » (Newton 1687). Autrement dit, dans un référentiel Galiléen, si la somme des forces extérieures appliquées à un système mécanique est nulle, alors son centre d'inertie G est au repos ou possède un Mouvement Rectiligne Uniforme (MRU). Son accélération est nulle, le système est dit en équilibre (Figure 1.2-1). Il en résulte qu'un objet est dit en équilibre statique si le Centre de Gravité (CdG), projection au sol du Centre de Masse (CdM), se situe au sein du polygone de sustentation (Winter 1995).

$$\sum \vec{\mu} = \vec{0} \text{ donc } \vec{a} = \vec{0} \text{ (repos ou MRU)}$$

Figure 1.2-1 : Formule de la Première Loi de Newton, avec  $\vec{\mu}$  forces appliquées et  $\vec{a}$  accélération

La posture quant à elle, se définit comme le maintien de tout ou partie du corps à un instant « t » dans une position donnée. Elle se caractérise par la position relative des segments corporels, leur orientation et leur stabilisation dans l'espace (Winter 1995; Pérennou 2012; Pollock et al. 2000). Chaque espèce animale adopte une posture préférentielle. Pour l'Humain, il s'agit de la station debout bipède, acquise au cours de l'évolution grâce à des modifications morphologiques en lien avec les contraintes fonctionnelles auxquelles il est soumis (Figure 1.2-2). D'autres espèces que l'Humain se mettent debout mais de manière occasionnelle car elle leur est coûteuse en énergie, et retournent rapidement à quatre pattes (Jean Massion 1992; Schmitt 2003; C. Tardieu 2018).

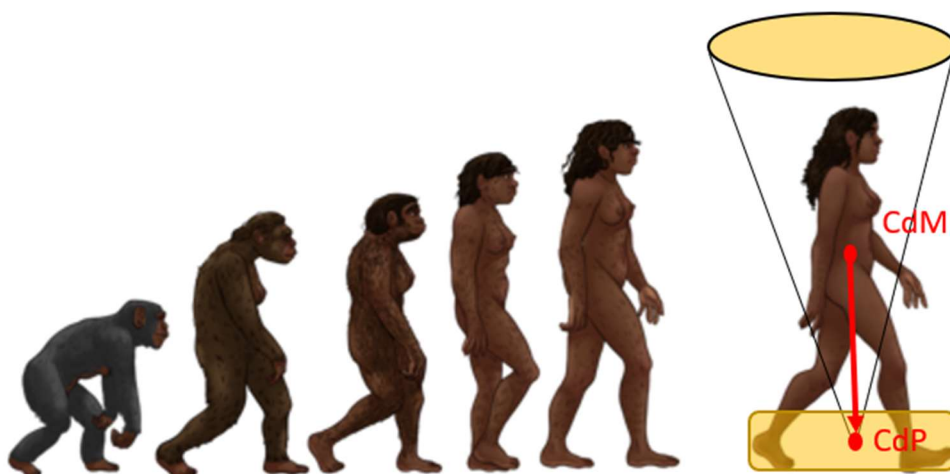


Figure 1.2-1 : Evolution de la posture de l'Humain, depuis la quadrupédie vers la station debout bipède

### 1.2.1.2 Applications à l'Humain

La première Loi de Newton peut être appliquée à l'Humain si on le considère comme un objet inanimé. Cependant trois points essentiels sont à prendre en considération :

1. Premièrement l'Humain est vivant. Comme tout être vivant, il est constamment soumis à des mouvements biologiques internes tels que la respiration pulmonaire, la contraction des muscles lisses, les battements du muscle cardiaque, les poumons qui se remplissent et se vident. Le corps ne se trouve donc jamais en situation d'équilibre parfait et présente des oscillations permanentes de basse fréquence ( $<0,5\text{Hz}$ ). On parle alors d'équilibre quasi-statique (Gagey et Weber 2004).
2. Deuxièmement, l'Humain interagit avec son environnement. En plus de des perturbations internes physiologiques décrites précédemment, l'Humain est soumis à des perturbations liées à ses interactions avec l'environnement : modification de l'espace dans lequel il évolue (obstacle...), stimulus sensoriels (bruit, odeur...), mouvements involontaires (réactions d'équilibration posturales, sursaut...), mouvements volontaires (marche, préhension...).
3. Troisièmement, l'Humain se tient debout. En position debout, le CdM du corps humain est haut placé (en regard de la 5<sup>ème</sup> vertèbre lombaire) et se projette dans un polygone de sustentation de taille réduite (surface située entre les bords externes des deux plantes de pieds) (Ivanenko et Gurfinkel 2018) (Figure 1.2-2).

Le système musculo-squelettique présente une grande complexité, en lien avec la multitude de structures anatomiques qui le composent. Il est alors intéressant de le modéliser comme un pendule inversé simple, en considérant que l'ensemble de sa masse corporelle est concentrée en un seul point, le Centre de Masse (CdM), qui oscille autour d'une unique articulation, l'articulation talo-crurale, qui ne présente aucun frottement. Cette approche très simpliste permet de poser les bases de l'analyse biomécanique de la posture humaine érigée (Jean Massion 1994; Paillard 2016) (Figure 1.2-2).

### 1.2.1.3 Le contrôle postural, socle du mouvement Humain

L'équilibre debout est une compétence fondamentale de l'Humain, nécessaire à la plupart de ses activités motrices et déplacements. Celui-ci requiert le contrôle d'un système poly-articulaire complexe et soumis à des perturbations internes et externes, alors même que la bipédie implique la diminution de la surface du polygone de sustentation et l'élévation du CdG (Ivanenko et Gurfinkel 2018). Dans le cas d'un objet inanimé, quand la ligne de gravité sort du polygone de sustentation, l'objet se déplace ou tombe. Cela est différent pour les animaux et l'Humain dont le corps est capable de déceler la rupture d'équilibre (i.e. sortie du CdP du polygone de sustentation) et de réagir afin d'éviter la chute. Ainsi, le contrôle postural peut être défini comme l'action « de maintenir, d'atteindre ou de rétablir un état d'équilibre au cours d'une posture ou d'une activité » (Pollock et al. 2000).

Lors de la production d'un acte moteur, deux niveaux différents du contrôle postural sont mis en jeu (Jean Massion 1992; Pérennou 2012; Duclos et Mesure 2016; Ivanenko et Gurfinkel 2018) :

- ✓ le niveau « posture », responsable de la lutte antigravitaire et du maintien du CdP au sein du polygone de sustentation ;
- ✓ le niveau « équilibre » qui compense les perturbations internes et externes, et permet le mouvement en fournissant une base stabilisée à l'action.

Ainsi, le contrôle postural constitue le socle de toutes nos activités motrices. Il implique une coordination complexe entre organes sensoriels, Système Nerveux Central (SNC) et système musculo-squelettique, afin de produire les stratégies motrices permettant de maintenir l'équilibre.



## 1.2.2 Bases neurophysiologiques du contrôle postural

Le contrôle postural repose sur l'interaction complexe entre le système sensoriel, le SNC et le système musculosquelettique (Ivanenko et Gurfinkel 2018; Robert J. Peterka 2018b; MacKinnon 2018; Forbes, Chen, et Blouin 2018) (Figure 1.2-3).

### 1.2.2.1 Les afférences sensorielles

Décrites par Sherrington dès la fin du 19<sup>ème</sup> siècle comme des « capteurs détecteurs d'erreurs », les afférences sensorielles du contrôle postural informent à tout moment le SNC sur la configuration segmentaire, la position, l'orientation et le déplacement du corps dans l'espace. Trois grands systèmes sont impliqués dans les afférences périphériques de la fonction d'équilibration : le système somato-sensoriel, le système vestibulaire et le système visuel (Robert J. Peterka 2018b; MacKinnon 2018; Lewis M. Nashner et McCollum 1985; Sherrington 1907; Burke 2007). Les afférences sensorielles participent également à la construction interne du schéma corporel et des référentiels spatiaux, tels que la perception de la verticale (Pérennou 2012).

#### 1.2.2.1.1 Le système somato-sensoriel

Le système somato-sensoriel est composé des récepteurs proprioceptifs musculaires et articulaires et des récepteurs somesthésiques cutanés plantaires. L'ensemble de ces récepteurs permet au SNC de construire une représentation précise de la position des segments corporels les uns par rapport aux autres.

##### ✓ Les récepteurs proprioceptifs musculaires et articulaires

Les récepteurs proprioceptifs musculaires sont de deux types. D'une part, les fuseaux neuromusculaires sont des mécanorécepteurs, disposés en parallèle des fibres musculaires au sein des muscles striés squelettiques. Ils renseignent le SNC sur l'état d'allongement des muscles, la vitesse de leur étirement et leurs variations de longueur, permettent de maintenir cette longueur constante. Ils participent ainsi au maintien de l'activité tonique du muscle et au tonus postural (tonus musculaire involontaire) et interviennent dans la mise en place du réflexe myotatique (contraction réflexe d'un muscle en réponse à son propre étirement). Enfin, ils contribuent à la localisation et l'orientation des segments corporels dans l'espace par des informations statiques et dynamiques. D'autre part, les organes tendineux de Golgi sont des mécanorécepteurs situés à la jonction du tendon et du muscle strié squelettique. Ils sont sensibles aux variations de tension appliquée par le muscle sur le tendon (que ce soit lors d'un étirement passif ou d'une contraction volontaire) et calculent la position et l'inertie des différents segments corporels dans l'espace. Ils sont responsables du réflexe myotatique inverse (inhibition des motoneurons  $\alpha$  et donc relâchement musculaire) (Proske et Gandevia 2012; Paillard 2016; MacKinnon 2018).

Les récepteurs proprioceptifs articulaires eux, sont situés au niveau de la capsule articulaire et des ligaments. Ils comprennent les corpuscules de Ruffini, les corpuscules de Pacini, les terminaisons nerveuses libres et les corpuscules de Golgi-Mazzoni. Sensibles à l'angle dans lequel est positionnée l'articulation, à la pression et à la tension capsulaire, ils réagissent aux variations d'amplitudes articulaires (MacKinnon 2018; Proske et Gandevia 2012; Paillard 2016).

##### ✓ Les récepteurs somesthésiques cutanés plantaires

La sole plantaire se situe à l'interface entre l'Humain et une partie de son environnement, le sol. Elle présente une densité importante de mécanorécepteurs sensibles à la pression, aux vibrations et aux étirements. Par exemple, les disques de Merkel et les corpuscules de Meissner sont respectivement

impliqués dans la reconnaissance tactile des objets et dans les déformations dynamiques de la peau, et contribuent non seulement au toucher, mais également au sens de la position. Dans le cadre de la fonction d'équilibration, les informations cutanées plantaires jouent trois grands rôles dans le contrôle postural : elles renseignent le SNC sur les limites du polygone de sustentation, elles transmettent des informations sur les propriétés physiques du support via l'information haptique (orientation, rigidité, compliance, stabilité, irrégularités) et elles remplissent un rôle proprioceptif en participant à la construction de la représentation du corps dans l'espace et de son orientation par rapport à la verticale (Roll, Kavounoudias, et Roll 2002; MacKinnon 2018; Marsico et al. 2022; Pérennou 2012; Thoumie et Do 1996).

#### 1.2.2.1.2 Le système vestibulaire

Le système vestibulaire, situé dans l'oreille interne, est composé de trois canaux semi-circulaires et d'organes otolithiques. Les canaux semi-circulaires prennent naissance et se terminent dans l'utricule et s'orientent dans les trois plans de l'espace. Ils sont sensibles aux accélérations angulaires de la tête autour de l'axe vertical, de l'axe transverse et de l'axe sagittal. Ainsi, ils fonctionnent comme une centrale inertielle de guidage qui renseigne le SNC sur la position et les mouvements de la tête dans l'espace. Le système otolithique lui est constitué par le saccule et l'utricule. Le premier est sensible aux accélérations linéaires verticales et le second aux accélérations linéaires horizontales. Ils sont sensibles à la position de la tête et à son accélération linéaire et renseignent le SNC sur la verticalité et la gravité. Il s'agit alors d'un véritable accéléromètre pouvant également fonctionner comme un inclinomètre capable de coder la position de la tête dans un référentiel géocentré (L. M. Nashner et al. 1989; Pérennou 2012; Paillard 2016; Ivanenko et Gurfinkel 2018; MacKinnon 2018). En renseignant le SNC sur la position de la tête et les accélérations linéaires subies ou provoquées par les mouvements du sujet, le système vestibulaire permet de maintenir le regard toujours horizontal. Il permet la stabilisation de la tête et contribue également à la stabilisation du tronc qd le support est instable et/ou petit.

#### 1.2.2.1.3 Le système visuel

Sur le plan anatomique et fonctionnel, on distingue la vision centrale et la vision périphérique. La vision centrale ou fovéale, représente une petite partie du champ visuel (3° à 5°) et est impliquée dans la reconnaissance des objets et leur localisation dans l'espace. La vision périphérique possède un champ visuel bien plus large que la vision fovéale mais avec une acuité moins élevée. Elle permet la perception du mouvement et renseigne le SNC sur les vitesses et les trajectoires (Forbes, Chen, et Blouin 2018a; Ivanenko et Gurfinkel 2018; Robert J. Peterka 2018). Concernant la fonction d'équilibration, la vision fovéale permet la fixation oculaire et intervient dans la planification et le guidage d'actes moteurs tels que la locomotion ou les mouvements de saisie, en renseignant par exemple sur la présence d'obstacles ou de cibles. La vision périphérique assure la perception du sens du mouvement dans l'espace du fait du sens de glissement de l'image sur la rétine. Ainsi, les informations visuelles jouent un rôle important pour le maintien de l'équilibre au cours des AVQ (Forbes, Chen, et Blouin 2018; Ivanenko et Gurfinkel 2018; Robert J. Peterka 2018).

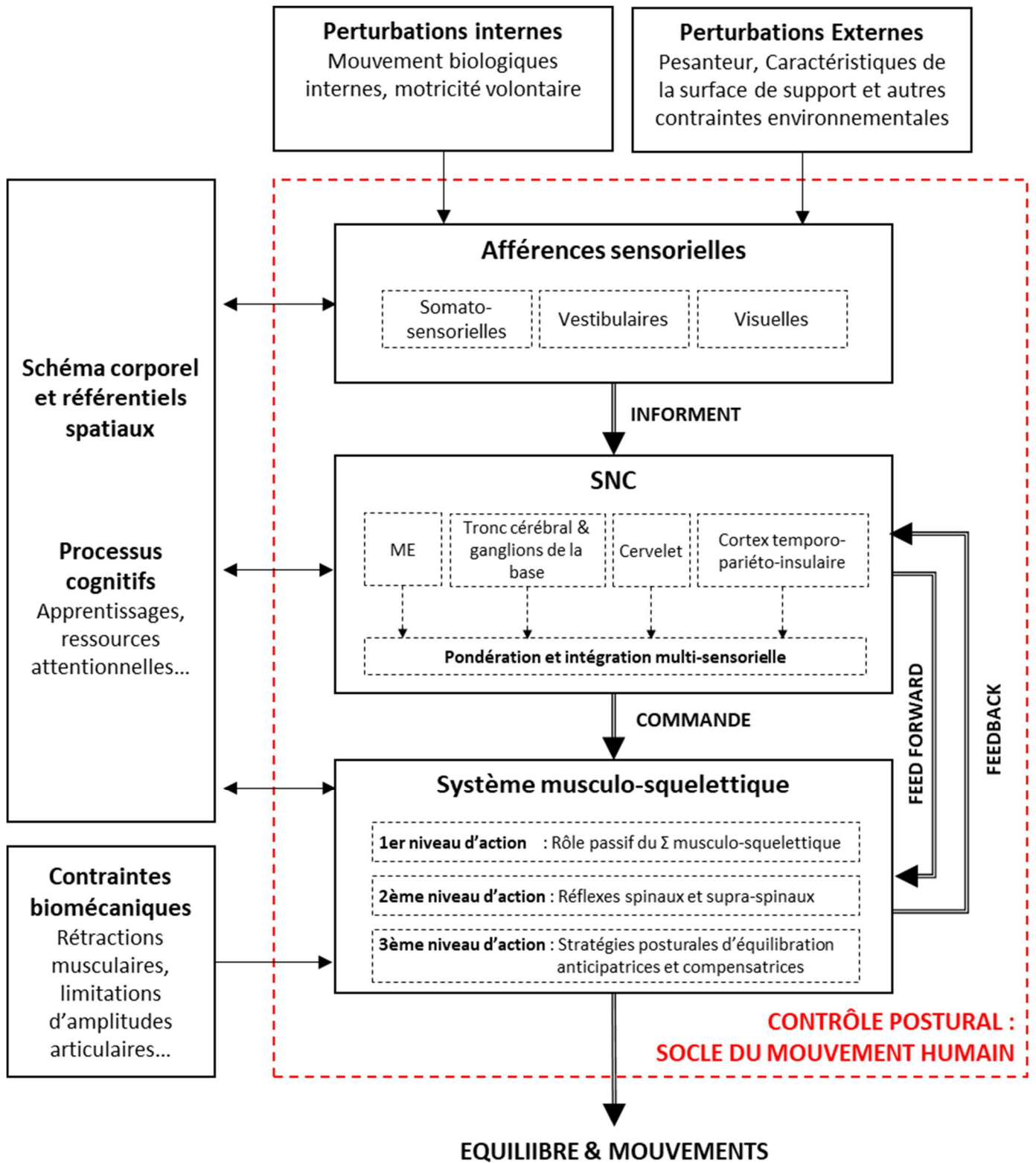


Figure 1.2-2. Schéma de synthèse de la physiologie du contrôle postural

#### 1.2.2.1.4 Schéma corporel et référentiels spatiaux

D'après sa première définition établie en 1911, le schéma corporel postural « constitue une représentation interne de la géométrie du corps, de sa dynamique et de son orientation par rapport à la verticale, aux segments entre eux ou à l'environnement » (Head et Holmes 1911). Autrement dit, le schéma corporel fait référence à la représentation mentale que nous nous faisons de notre propre corps. Il se construit à partir d'afférences sensorielles (somato-sensorielles, vestibulaires, visuelles), d'expériences sensorielles et motrices vécues, ainsi que de nos interactions sociales et culturelles. Le schéma corporel comprend des informations sur la taille et la forme du corps, la position et le mouvement des différents segments corporels les uns par rapport aux autres (Dijkerman et de Haan 2007; Naito, Morita, et Amemiya 2016). Ainsi, il joue un rôle primordial dans la coordination motrice ou les déplacements dans un espace donné.

Les référentiels spatiaux, quant à eux, sont des systèmes de référence que nous utilisons pour décrire la position et le mouvement des objets dans l'espace, indispensables au contrôle postural et à l'orientation spatiale de nos mouvements (Berthoz 2008; Isableu et al. 2010). Par exemple, le référentiel corporel se base sur la position et les mouvements de notre propre corps dans l'espace. Il nous permet de situer les objets ou les événements en utilisant des termes tels que "devant moi", "derrière moi", "à ma droite" ou "à ma gauche". Dans le cadre de l'étude du contrôle postural, on utilise habituellement le référentiel terrestre (ou référentiel du laboratoire) cartésien orthonormé, constitué d'un système de trois coordonnées d'espace (x,y,z, dont l'origine est un point du sol) et d'une coordonnée de temps. Ce référentiel permet de décrire les différents plans (frontal, sagittal, transverse) et axes (vertical, médio-latéral, antéro-postérieur) nécessaires à l'étude de la posture et du mouvement humain (Noé et Paillard 2016). Le système vestibulaire tient un rôle prépondérant dans la perception de la gravité, et la construction du cadre de référence gravitaire (Jean Massion 1994; Paillard 2016). Ainsi, lors d'une lésion vestibulaire unilatérale, on pourra noter des troubles de l'orientation posturale caractérisés par une inclinaison de la tête et du tronc du côté de la lésion (Fukuda 1959).

Ainsi, le schéma corporel et les référentiels spatiaux sont deux concepts étroitement liés et déterminants dans la façon dont nous percevons et interagissons avec notre environnement spatial.

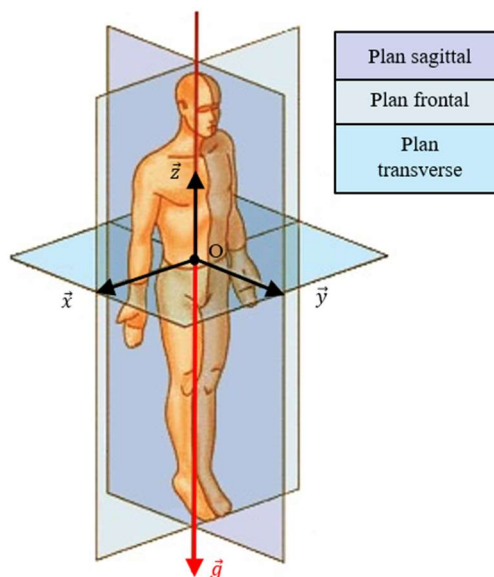


Figure 1.2-4 : Schématisation du corps Humain situé dans le référentiel terrestre cartésien orthonormé, constitué d'un système de trois coordonnées d'espace (x,y,z) et de trois plans (frontal, sagittal, transverse)

### 1.2.2.2 Intégration centrale du contrôle postural

L'intégration centrale des afférences sensorielles est le processus par lequel le SNC combine et traite les informations somato-sensorielles, vestibulaires et visuelles, dans le but de maintenir l'équilibre et la stabilité posturale (Figure 1.2-3).

#### 1.2.2.2.1 Les centres intégrateurs du contrôle postural

Le SNC reçoit à chaque instant des informations sensorielles (somato-sensorielles, vestibulaires et visuelles) qui lui permettent de construire une représentation précise de l'environnement, de la configuration segmentaire et de la position du corps dans celui-ci. Ces informations sont traitées par les centres intégrateurs du contrôle postural (la Moëlle Epinière, le tronc cérébral, les ganglions de la base, les noyaux vestibulaires, la formation réticulée, le thalamus postéro-latéral, le cervelet et le cortex temporo-pariéto-insulaire), afin d'élaborer une activité motrice posturale et garantir le maintien de l'équilibre (Pérennou 2012; Robert J. Peterka 2018; Bronstein 2016; Paillard 2016).

1. La moëlle épinière constitue le premier niveau d'intégration du contrôle postural. Elle donne lieu à des ajustements posturaux réflexes, qui sont par définition automatisés et rapides, responsables du tonus musculaire antigravitaire. Tout d'abord, le réflexe myotatique est un réflexe monosynaptique en boucle courte. Il provoque l'excitation des motoneurones  $\alpha$  d'un muscle en réponse à son propre étirement (information donnée par les fuseaux neuromusculaires) et induit l'inhibition des motoneurones des muscles antagonistes par le biais de l'inhibition réciproque. Aussi, le réflexe myotatique inverse a une action inhibitrice sur les motoneurones  $\alpha$  d'un muscle en réponse à une stimulation des organes tendineux de Golgi. Son rôle est de moduler l'intensité de la contraction musculaire. Enfin, le réflexe ipsilatéral d'extension induit la contraction des muscles extenseurs des membres inférieurs en réponse à la stimulation des récepteurs de pressions de la plante des pieds.
2. Le tronc cérébral (noyaux vestibulaires et formation réticulée) et les ganglions de la base constituent les centres régulateurs des ajustements posturaux. Ils agissent en anticipation (*feed-forward*) et en boucle de rétroaction (*feed-back*).

Les noyaux vestibulaires, au nombre de quatre et situés dans le bulbe rachidien, ont chacun une fonction propre selon l'origine de leurs afférences. Le noyau vestibulaire latéral recevant des afférences vestibulaires primaires et le noyau vestibulaire inférieur recevant des informations vestibulaires et cérébelleuses, jouent un rôle important dans la modulation du tonus postural, via les faisceaux vestibulo-spinaux se projetant sur les motoneurones de la corne antérieure de la moëlle épinière. La formation réticulée pontique et bulbaire, reçoit des informations directes ou indirectes de l'ensemble des structures en lien avec le contrôle postural, et joue un rôle primordial dans la modulation du tonus postural via les faisceaux réticulo-spinaux.

Les ganglions de la base jouent un rôle majeur dans les processus de contrôle moteur (planification et exécution du mouvement) et dans les processus cognitifs (mémoire, comportement, émotions), tous potentiellement en lien avec le contrôle postural, et participent également au contrôle de la posture et du tonus via le noyau pédiculo-pontin. Le thalamus postéro-latéral joue un rôle particulièrement important dans la fusion des référentiels gravitationnels somesthésique et vestibulaire, contribuant au modèle interne de verticalité.

3. Le cervelet reçoit des afférences sensorielles des systèmes somato-sensoriel, vestibulaire et visuel, qui l'informent sur les programmes moteurs en cours de planification et en cours de réalisation. Ainsi, il joue un rôle fondamental dans la planification et la réorganisation des commandes motrices, tels que les ajustements posturaux et réactions posturales d'équilibration, en modulant l'activité des faisceaux moteurs descendants (rubro-, réticulo- et vestibulo-spinaux). Il est également responsable

de la coordination du tonus postural et des mouvements volontaires via la réalisation de synergies musculaires. Enfin, le cervelet est impliqué dans les processus d'apprentissage et de mémoire motrice et spatiale, grâce à un système de comparaison de l'acte réalisé à l'acte programmé (copie d'afférences à copie d'efférences).

4. Le cortex temporo-pariéto-insulaire, également appelé « cortex postural », est composé des hémisphères cérébraux au niveau de l'aire motrice supplémentaire et du lobe pariétal droit. Il joue un rôle décisif dans les représentations internes de verticalité et dans la perception de l'espace, permettant la construction d'un référentiel gravitaire vertical.

#### 1.2.2.2 Intégration multisensorielle de la fonction d'équilibration

L'intégration multisensorielle est un processus complexe par lequel le cerveau combine les informations sensorielles afférentes, afin de former une perception complète et cohérente du monde qui l'entoure. Les différentes afférences sensorielles sont fusionnées et intégrées dans des régions spécifiques du cerveau, telles que le cortex pariétal et le cortex temporal.

##### ✓ Redondance des informations et conflits sensoriels

En situation physiologique, le SNC reçoit en continu des afférences sensorielles complémentaires, concordantes et redondantes (Jean Massion 1994; Robert J. Peterka 2018). Par exemple, lorsqu'un sujet debout est en train de chuter vers l'arrière, un ensemble d'informations sensorielles vont être produites : le système vestibulaire informe d'une accélération céphalique vers l'arrière, le système visuel périphérique détecte un défilement rétinien vers l'avant alors que le système visuel périphérique perçoit un déplacement vers l'arrière par rapport à un point fixe de l'environnement, les fuseaux neuromusculaires des releveurs du pied détectent un allongement musculaire, les récepteurs périarticulaires de l'articulation talo-crurale détectent un mouvement de flexion plantaire et les récepteurs plantaires de Pacini détectent une variation de pression des orteils vers les talons. Ainsi, la redondance des informations sensorielles permet d'augmenter la fiabilité et la précision des informations compilées et de réduire les erreurs de perception, en fournissant plusieurs sources d'informations sur un évènement donné (Bronstein 2016; Chiba et al. 2016). La redondance des informations sensorielles peut aussi permettre de compenser les éventuels déficits sensoriels. En cas de trouble vestibulaire par exemple, les informations visuelles sont utilisées pour se substituer aux informations vestibulaires déficientes avec, pour conséquence, la majoration de la visuo-dépendance pour la fonction d'équilibration (Lloyd-Esenkaya et al. 2020).

Un conflit sensoriel se produit lorsque les afférences sensorielles reçues par le SNC sont discordantes. Le mal des transports, qui résulte d'une contradiction entre les informations visuelles (le sujet se voit immobile à l'intérieur du véhicule) et vestibulaires (perception de mouvement du véhicule dans l'espace), constitue un exemple courant de conflit sensoriel (Allison et Jeka 2004; Jones et Noppeney 2021).

##### ✓ Pondération des afférences sensorielles

Au cours des dernières décennies, de nombreuses études posturographiques, basées sur la manipulation des informations somato-sensorielles, vestibulaires et visuelles, ont permis de mettre en évidence le phénomène de pondération sensorielle. En effet, les contributions relatives des différents systèmes sensoriels au maintien de l'équilibre, varient et s'adaptent en fonction des contraintes environnementales, et des caractéristiques propres à chaque individu (Robert J. Peterka 2018; Jeka, Oie, et Kiemel 2008). La pondération sensorielle se définit alors comme la capacité du SNC à sélectionner puis augmenter ou diminuer l'influence des différentes afférences sensorielles sur le contrôle postural (Lewis M. Nashner 1982).

Le SNC utilise toutes les sources d'informations sensorielles disponibles pour évaluer la position et les mouvements du corps dans l'espace. Toutefois, la prise en compte de chaque information sensorielle varie en fonction des spécificités de l'environnement auquel est soumis l'individu à un instant donné (McIlroy et al. 2003; Duclos et Mesure 2016). En effet, les caractéristiques du support orientent la pondération sensorielle. Par exemple, lors de l'équilibre debout sur une surface compliant telle qu'une mousse de perturbation posturale, les informations visuelles prendront le pas sur les informations somato-sensorielles, altérées par la nature de la base de support. Un individu en équilibre debout sur un support mobile aura lui tendance à utiliser d'avantage ses informations sensorielles d'origine vestibulaire (Polastri et Barela 2013; Robert J. Peterka 2018).

La pondération des afférences sensorielles est également influencée par les caractéristiques de chaque individu (Anne Shumway-Cook et Woollacott 1995; Duclos et Mesure 2016). Tout d'abord l'âge de l'individu semble être un facteur de pondération des informations sensorielles. En effet, le poids des informations visuelles et vestibulaires tend à diminuer avec l'avancée en âge, en lien avec la dégradation de ces systèmes sensoriels (Faraldo-García et al. 2012; Rinaldi, Polastri, et Barela 2009). Aussi, toute pathologie entraînant un déficit du système somato-sensoriel, vestibulaire ou visuel, ou encore des troubles neurologiques, entraîneront une modification du poids relatif des informations sensorielles (Missaoui et Thoumie 2013). Enfin, l'expérience motrice, l'entraînement sportif, ou encore la rééducation, sont susceptibles de modifier la pondération sensorielle via des phénomènes d'apprentissage sensori-moteur (Mesure et Lamendin 2001).

En résumé, la régulation dynamique du poids relatif accordé aux afférences somato-sensorielles, vestibulaires ou visuelles, dépend de la disponibilité et de la fiabilité de ces informations. Si une perturbation interne (comme une pathologie neurologique ou une atteinte sensorielle) ou externe (comme une altération du support) se produit, le SNC sélectionne et accorde plus d'importance aux informations qu'il considère comme fiables et nécessaires pour maintenir l'équilibre, tout en négligeant celles qu'il juge peu fiables ou indisponibles.

### **1.2.2.3 Les effecteurs musculaires**

Le maintien de la posture en station debout implique d'une part de s'opposer à l'action de la gravité qui s'exerce sur le corps, et d'autre part de stabiliser le corps face aux perturbations intrinsèques et/ou extrinsèques qui mettent en jeu son équilibre. Ce sont les muscles posturaux, qui assurent ces missions.

Les muscles posturaux sont situés sur l'ensemble du système musculo-squelettique, axial et périphérique (Figure 1.2-5). D'un point de vue biomécanique, leur répartition permet d'assurer le maintien du centre de gravité dans le polygone de sustentation. En effet, ils s'opposent pour chaque articulation, au moment du centre de gravité des segments corporels sus-jacents. Par exemple la projection du centre de gravité en avant du centre de rotation des genoux permet de tenir debout sans activation par la seule mise en tension des éléments capsulo-ligamentaires postérieurs. L'activation du quadriceps permet d'assurer le verrouillage du genou dès que celui-ci s'écarte de la position d'extension. Au niveau de la cheville, la projection du centre de gravité passe peu en avant de l'axe de la tibio-tarsienne, faisant intervenir une activation prédominante du Triceps Sural dans le contrôle du verrouillage du pied au sol.

Les muscles posturaux agissent grâce à des mécanismes passifs et/ou actifs, suivant trois niveaux d'action. Le premier, passif, repose sur la structure du système musculo-squelettique. Le deuxième niveau d'action, actif, implique les réflexes spinaux et supra-spinaux, à l'origine du tonus postural antigravitaire. Enfin le troisième, également actif, correspond aux différentes stratégies posturales d'équilibrations (Figure 1.2-3).

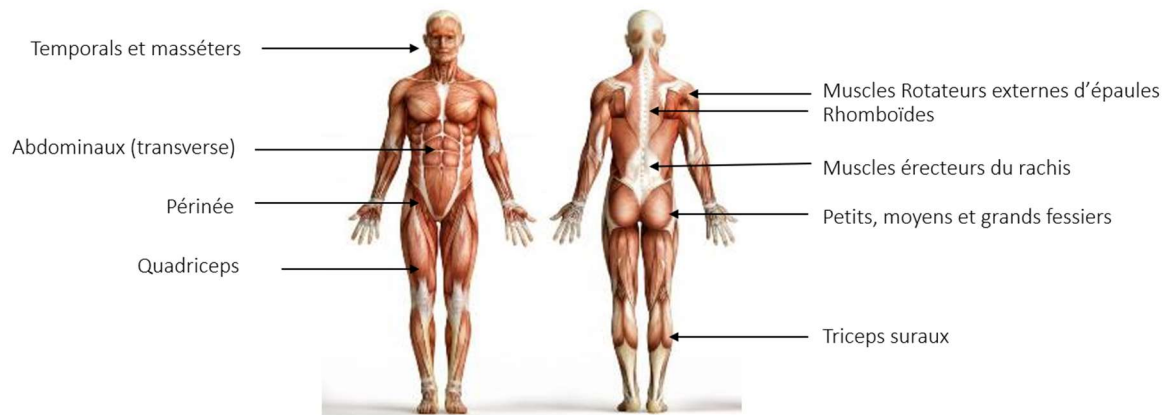


Figure 1.2-5: Muscles striés squelettiques le plus impliqués dans le maintien de la posture (ou muscles posturaux)

#### 1.2.2.3.1 Premier niveau d'action : rôle passif du système musculo-squelettique

Le système musculo-squelettique joue un rôle passif important dans le maintien de la station debout. Le squelette humain, en particulier la colonne vertébrale, les os du bassin, des membres inférieurs et des pieds, se sont modifiés au cours de l'évolution, afin de permettre une position bipède stabilisée (Shefelbine, Tardieu, et Carter 2002; Abelin-Genevois 2021). En position debout, les os du tronc et des membres inférieurs s'empilent verticalement pour former une colonne stable, tandis que les articulations, les ligaments, les tendons et le tonus de base des muscles posturaux les muscles posturaux travaillent en synergie pour maintenir cette structure d'aplomb, tout en permettant des mouvements fluides.

#### 1.2.2.3.2 Deuxième niveau d'action : activité réflexe du tonus postural antigravitaire

Décrit par Sherrington en 1907, le tonus musculaire anti gravitaire se définit comme une activité tonique permanente permettant de conserver la station debout contre pesanteur, tout en constituant un support pour la réalisation de mouvements volontaires (Sherrington 1907; Molnár et Brown 2010). La distribution du tonus postural, essentiellement régulée par des circuits situés dans la moëlle épinière et le tronc cérébral. S'établit par des réflexes spinaux, issus de la Moëlle Epinière, des réflexes supra-spinaux, issus du tronc cérébral et des noyaux vestibulaires.

##### ✓ Les réflexes spinaux

La moëlle épinière génère des réponses réflexes antigravitaires grâce aux afférences sensorielles musculaires d'une part (le réflexe myotatique via le fuseau neuro-musculaire et le réflexe myotatique inverse via l'organe tendineux de Golgi) et aux afférences cutanées plantaires et articulaires d'autre part (le réflexe de flexion via les mécanorécepteurs) (Pérennou 2012; Ivanenko et Gurfinkel 2018; Lloyd 1950; Jean Massion 1994).

Tout d'abord, le réflexe myotatique constitue le principal mécanisme impliqué dans la régulation du tonus postural. Il s'agit d'un réflexe monosynaptique en boucle courte. Il provoque l'excitation des motoneurones  $\alpha$  d'un muscle en réponse à son propre étirement (information donnée par les fuseaux neuromusculaires) et induit l'inhibition des motoneurones des muscles antagonistes par le biais de l'inhibition réciproque. En s'opposant à l'allongement musculaire, donc au déplacement d'un segment corporel par rapport à une posture initiale, le réflexe myotatique participe au maintien des postures érigées. Ensuite, le réflexe myotatique inverse, lui, est provoqué par les afférences tendineuses de Golgi qui inhibent les motoneurones  $\alpha$  et  $\gamma$  par l'intermédiaire d'un interneurone. Ainsi, il inhibe le réflexe myotatique lorsque l'étirement du muscle devient trop important, et prévient une raideur musculaire



trop importante qui pourrait être délétère pour le maintien de la posture. Enfin, par le réflexe ipsilatéral d'extension, les informations cutanées plantaires et articulaires du pied et de la talo-crurale, entraînent la co-contraction des muscles du segment jambier pour stabiliser le pied, et une augmentation du tonus postural fléchisseurs plantaires permettant de supporter le poids du corps contre pesanteur (Pérennou 2012; Ivanenko et Gurfinkel 2018; Lloyd 1950; Jean Massion 1994).

#### ✓ Les réflexes supra-spinaux

Le réflexe myotatique, responsable sous l'effet de la pesanteur d'une excitation permanente des motoneurones  $\alpha$ , peut être modulé par des influences supra-spinales excitatrices ou inhibitrices. Les réflexes supra-spinaux, issus du tronc cérébral et des noyaux vestibulaires, contribuent ainsi au tonus postural antigravitaire. Ils sont déclenchés et modulés par les informations sensorielles vestibulaires et somesthésiques de la région cervicale (Pérennou 2012; Ivanenko et Gurfinkel 2018; Lloyd 1950; Jean Massion 1994). On distingue :

- Le réflexe tonique du cou, qui modifie la répartition du tonus postural entre les membres supérieurs et inférieurs afin de maintenir l'alignement de la tête avec le tronc.
- Le réflexe vestibulo-oculaire, qui a pour fonction de stabiliser l'image sur la rétine lorsque la tête est en mouvement, afin de garder une vision nette.
- Le réflexe vestibulo-spinal qui modifie l'activité tonique des muscles antigravitaires afin de restaurer la position de la tête par rapport à la verticale. Il est également responsable de la répartition du tonus entre muscles postérieurs et antérieurs ainsi qu'entre muscles hémicorporels gauches et droits.
- Le réflexe vestibulo-colique qui permet de maintenir la tête par rapport au centre de gravité lorsque le regard est fixe et que le corps est en mouvement.

#### 1.2.2.3.3 Troisième niveau d'action : stratégies posturales d'équilibration

A partir de l'intégration des informations somato-sensorielles, vestibulaires et visuelles, le SNC génère un ensemble coordonné d'actes moteurs, afin de maintenir et d'adapter la posture et l'équilibre debout, malgré la complexité des perturbations internes et externes qui s'appliquent à chaque individu. Ces stratégies posturales d'équilibration sont de deux types. D'une part les stratégies posturales d'équilibration anticipatrices, que l'on observe en préparation à la perturbation, afin que le déséquilibre induit par celle-ci soit maîtrisé. D'autre part les stratégies posturales d'équilibration compensatrices, qui interviennent en réaction au déséquilibre induit par une perturbation interne ou externe (Jean Massion 1994; Ivanenko et Gurfinkel 2018).

Le contrôle postural et la réalisation d'actes moteurs, sont intégrés dans des processus de régulation en boucle ouverte et boucle fermée. La boucle ouverte ou « *feedforward* », est un système de contrôle postural prédictif, où les afférences sensorielles sont utilisées pour anticiper une déstabilisation à venir et programmer un mouvement adapté à la situation future. La boucle fermée ou « *feedback* » quant à elle, constitue un système de contrôle postural réactif (boucles neurologiques de rétroaction). Les informations sensorielles sont utilisées pour détecter les perturbations de l'équilibre et pour déclencher des réponses musculaires nécessaires au maintien de l'équilibre (Jean Massion 1994; Ivanenko et Gurfinkel 2018; Haas et al. 1989).

#### ✓ Les stratégies posturales d'équilibration anticipatrices

Les stratégies posturales d'équilibration anticipatrices, également appelées ajustements posturaux anticipateurs (APA) se produisent avant l'exécution d'un mouvement volontaire, pour préparer le corps à l'action à venir et minimiser les perturbations posturales qui pourraient en découler (J. Massion et al. 1999; Bouisset et Zattara 1987).

Un exemple concret d'APA se produit lorsque nous planifions de saisir un objet devant nous. Avant même que les muscles des membres supérieurs impliqués dans l'acte de saisir ne s'activent, les muscles des membres inférieurs et du tronc tels que les triceps suraux, les ischio-jambiers et les muscles paravertébraux se contractent pour compenser les perturbations posturales liées à la saisie de l'objet en question. En effet, l'avancée des membres supérieurs vers l'avant et le soulèvement de l'objet, impliquent un déplacement du CdG, proportionnel à la longueur d'allongement des membres supérieurs et aux caractéristiques physiques de l'objet saisi. Ce phénomène a été décrit pour la première fois en 1967 dans les travaux de Belen'kii et al. qui, par des enregistrements électromyographiques, ont observé une activation anticipée de certains muscles du tronc et des membres inférieurs, avant une élévation antérieure rapide du membre supérieur pour un individu en position debout, afin de limiter le coût énergétique du maintien postural (Belenkii, Gurfinkel, et Paltsev 1967).

Dès lors, de nombreuses études se sont intéressées aux APA et ont mis en évidence que leurs caractéristiques varient en fonction de celles du mouvement et des perturbations à venir d'une part (Kasai et Taga 1992) et des conditions initiales de stabilité d'autre part (Adkin et al. 2002; Aruin, Forrest, et Latash 1998; Slijper et Latash 2000; Cavallari et al. 2016; Pienciak-Siewert, Horan, et Ahmed 2020). Enfin, il a plus récemment été souligné que par l'apprentissage moteur, et plus particulièrement grâce à la rééducation neuro-motrice, les APA évoluent vers une plus grande efficacité avec l'entraînement des individus (Aruin 2016; Wallard et al. 2016).

#### ✓ Les stratégies posturales d'équilibration compensatrices

Les stratégies posturales d'équilibration compensatrices, également appelées ajustements posturaux réactionnels, interviennent en réaction au déséquilibre induit par une perturbation interne et/ou externe non anticipées (Ivanenko et Gurfinkel 2018; Jean Massion 1994; Duclos et Mesure 2016; Pérennou 2012). Celles-ci font appel à un ensemble de coordinations motrices impliquant tout ou partie segments corporels. En effet, le corps humain peut être représenté par un ensemble de segments corporels, mobiles les uns par rapport aux autres et coordonnés les uns avec les autres et positionnés les uns par rapport aux autres d'une multitude de façons différentes. Ces différentes combinaisons, ou coordinations posturales, permettent à chacun de se tenir assis ou debout, de se mouvoir, et de réaliser des tâches motrices sans chuter, malgré les contraintes internes et externes qui s'appliquent au corps. Les coordinations posturales sont couramment décrites suivant deux courants de pensée principaux : l'approche dite neuro-musculaire et l'approche dite dynamique (L. Marin et Bardy 2011).

Dans les années 1980, Nashner et al. établissent qu'il existe un nombre limité de stratégies posturales d'équilibration dans le répertoire moteur humain (Lewis M. Nashner 1982; Lewis M. Nashner et McCollum 1985; Cordo et Nashner 1982; F. B. Horak et Nashner 1986). En effet, le SNC ne saurait gérer un catalogue illimité de coordinations posturales. Alors certaines parties du corps se rigidifient afin de diminuer le nombre de degrés de liberté articulaires à contrôler à un instant donné (Bernstein 1967; Lewis M. Nashner et McCollum 1985). Dans ce cadre, quatre stratégies posturales d'équilibration dans le plan sagittal sont décrites : la stratégie de hanche et la stratégie de cheville qui sont décrites ci-après, mais aussi la stratégie verticale (triple flexion coordonnée des articulations de hanches, de genoux et de chevilles, dans le but d'abaisser le CdG de l'individu) et la stratégie du pas en avant (Figure 1.2-7). Ces stratégies posturales d'équilibration peuvent être modulées en intensité, fréquence et amplitude par le SNC pour réguler le contrôle postural. Le choix de la stratégie à utiliser dans une situation donnée est mené par le SNC, en fonction des exigences biomécaniques liées au maintien de la posture, et aux caractéristiques de la surface d'appui. La stratégie de cheville correspond à un déplacement de l'ensemble du corps en rectitude autour de l'articulation talo-crurale, tel un pendule inversé (F. B. Horak et Nashner 1986; McCollum et Leen 1989; Lewis M. Nashner et McCollum 1985). Dans ce cas, les articulations des hanches et genoux sont fixées par co-contractions des grands fessiers/ilio-psoas d'une part, et des ischio-jambiers/quadriceps d'autre part. La stratégie de hanche elle, implique un déplacement simultané et en sens opposé des articulations de hanches et de chevilles, tel un double

<b>Approche neuro-musculaire</b> <i>(Lewis M. Nashner et McCollum 1985; Ferry, Cahouët, et Martin 2007; Diener et al. 1991; 1982; F. B. Horak, Diener, et Nashner 1989; Vaugoyeau et al. 2008; Lekhel et al. 1994)</i>			<b>Approche dynamique</b> <i>(L. Marin et Bardy 2011; B. G. Bardy et al. 1999; Benoît G. Bardy et al. 2002; Faugloire, Bardy, et Stoffregen 2009; Oullier et al. 2002; 2004)</i>		
Caractéristiques de la perturbation	Caractéristiques de la surface d'appui		Contraintes intrinsèques <i>morphologie, âge, niveau d'éveil/fatigue, expériences motrices, blessures/troubles neuro-moteurs</i>	Contraintes environnementales <i>gravité, caractéristiques de la surface de support</i>	Contraintes intentionnelles <i>finalité de la tâche à effectuer</i>
Fréquence < 0.2Hz Amplitude < 20° Faible vitesse Courte durée	Sol glissant (sans frottements)	<b>Stratégie de cheville</b>	Phase relative de 0°	Déplacements de tête de faible amplitude (5 à 14 cm) et de basse fréquence <0.4Hz	-
0.2Hz < Fréquence < 2.5Hz Amplitude > 20°	Support étroit (poutre) Sol mou/déformable (tapis, sable) Support mobile	<b>Stratégie de hanche</b>	Phase relative de 180°	Déplacements de tête de grande amplitude (18 à 83cm) et de haute fréquence >0.5Hz	-
-	-	<b>Stratégie mixte</b>	Phase relative entre 0° et 180°	-	-

Figure 1.2-6 : Approche neuro-musculaire et approche dynamique des coordinations posturales (L. Marin et Bardy 2011)

pendule inversé (F. B. Horak et Nashner 1986; McCollum et Leen 1989). Toutefois, il peut sembler réducteur de résumer l'ensemble des organisations posturales du tronc et des membres inférieurs dans le plan sagittal à deux coordinations posturales. Même après l'introduction de la notion de notion de stratégies mixtes, permettant d'établir un continuum de combinaisons posturales, entre les stratégies de cheville et de hanche, certaines ambiguïtés persistent et aboutissent à l'émergence de l'approche dynamique (B. G. Bardy et al. 1999; Faugloire, Bardy, et Stoffregen 2009; Ludovic Marin et al. 1999; Oullier et al. 2006; L. Marin et Bardy 2011).

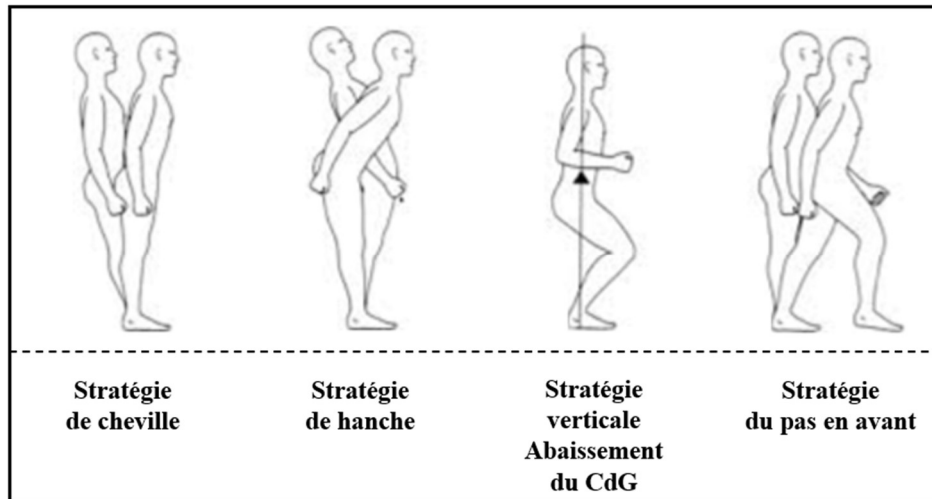


Figure 1.2-7: Schématisation des quatre stratégies posturales d'équilibration décrites dans le plan sagittal selon l'approche neuro-musculaire

L'approche dynamique prend appui sur l'idée que le système musculo-squelettique est composé d'une multitude de composants (tels que des articulations, des muscles mono-articulaires ou bi-articulaires, des tendons, des ligaments, des tendons, ou encore des enveloppes conjonctives), qui interagissent les uns avec les autres sous l'influence de contraintes internes et/ou externes (Kelso et al. 1981; Kugler, Scott Kelso, et Turvey 1980). Ainsi concernant les coordinations posturales, il existe un nombre illimité de coordinations possibles entre les différents composants du système. Cependant, de nombreuses études décrivent qu'un nombre limité de coordinations posturales « préférentielles » émerge sous l'action conjointe de contraintes intrinsèques, environnementales et intentionnelles (L. Marin et Bardy 2011; B. G. Bardy et al. 1999; Benoît G. Bardy et al. 2002; Faugloire, Bardy, et Stoffregen 2009; Ludovic Marin et al. 1999; Oullier et al. 2002; 2004). Ainsi, deux modes de coordinations sont couramment observés. Le mode de coordination en phase ( $\phi$  hanche-cheville)  $\approx 0-20^\circ$  où hanches et genoux se déplacent simultanément dans une même direction. Et le mode de coordination en anti-phase ( $\phi$  hanche-cheville)  $\approx 180^\circ$  où hanches et les genoux se déplacent simultanément dans une direction opposée. Cependant, sous diverses contraintes, d'autres coordinations entre les hanches et les chevilles peuvent émerger, et toute valeur intermédiaire de phase relative traduit une avance ou un retard de phase d'une articulation sur l'autre (Figure 1.2-6).

Les réactions d'équilibration posturales ont été décrites par Sherrington puis par Magnus comme une succession d'activités réflexes (Sherrington 1907; Magnus 1926). Aujourd'hui, nous savons que le SNC occupe une place centrale dans le contrôle de la posture et de l'équilibre. Pour preuve, un animal décérébré ne peut stabiliser sa posture, donc les circuits neuronaux reliant le tronc cérébral à la Moëlle Epinière ne suffisent pas au contrôle postural (Pérennou 2012; F. B. Horak, Diener, et Nashner 1989). Cela implique que la fonction d'équilibration posturale, comme toute autre activité motrice, requiert un apprentissage et peut être entraînée et rééduquée afin d'en améliorer son efficacité (Jean Massion 1994; Pollock et al. 2000; R. Dewar, Love, et Johnston 2015; F. Horak et Moore 1993).

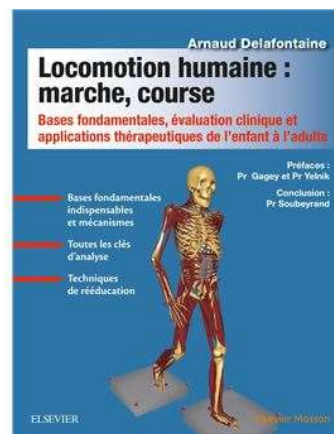
## 1.3 Développement et maturation de la fonction d'équilibration de la naissance à l'adolescence

« The miracle of children is that we just don't know how they will change or who they will become. » (Eileen Kennedy-Moore)

### 1.3.1 Bases neuro-physiologiques du développement posturo-moteur au cours de la première année de vie

La section suivante est extraite d'un chapitre de livre co-écrit par l'auteure de ce manuscrit de thèse (Pages 62 à 71) :

Delafontaine Arnaud. « Locomotion humaine: Bases fondamentales, évaluation clinique et applications thérapeutiques de l'enfant à l'adulte ». Elsevier Health Sciences, 2018.  
Chapitre 4 « Acquisition, développement et altérations de la marche à travers les âges ». Fontaine Audrey, Artico Romain, Delafontaine Arnaud



---

### Maturation du système nerveux central

Le développement du Système Nerveux Central (SNC) débute précocement au cours de l'embryogenèse. Au 7<sup>ème</sup> mois de vie fœtale, le cerveau est déjà composé de 10 milliards de neurones et la morphologie du SNC est achevée. C'est le début d'une longue période de maturation qui se poursuivra jusqu'à la fin de l'adolescence (Lenroot et Giedd 2006) (Fig. 3.1). Différents processus sont impliqués dans la maturation du SNC:

- la myélinisation: rapide du 4<sup>ème</sup> mois de vie fœtale à l'âge de deux ans, puis se poursuivant lentement jusqu'à l'âge de 20 ans,
- l'apparition de réseaux-neuronaux grâce à la mise en place de synapses inter-neurales: en nombre excédentaire dans un premier temps, jusqu'à une étape dite d'élagage synaptique à l'adolescence,
- l'organisation de l'activité électrique du cerveau pour aboutir à l'âge de 8-9 mois de vie à une différenciation entre l'activité de veille et de sommeil,
- l'organisation des grands systèmes neuro-fonctionnels, comme le système sensorimoteur.

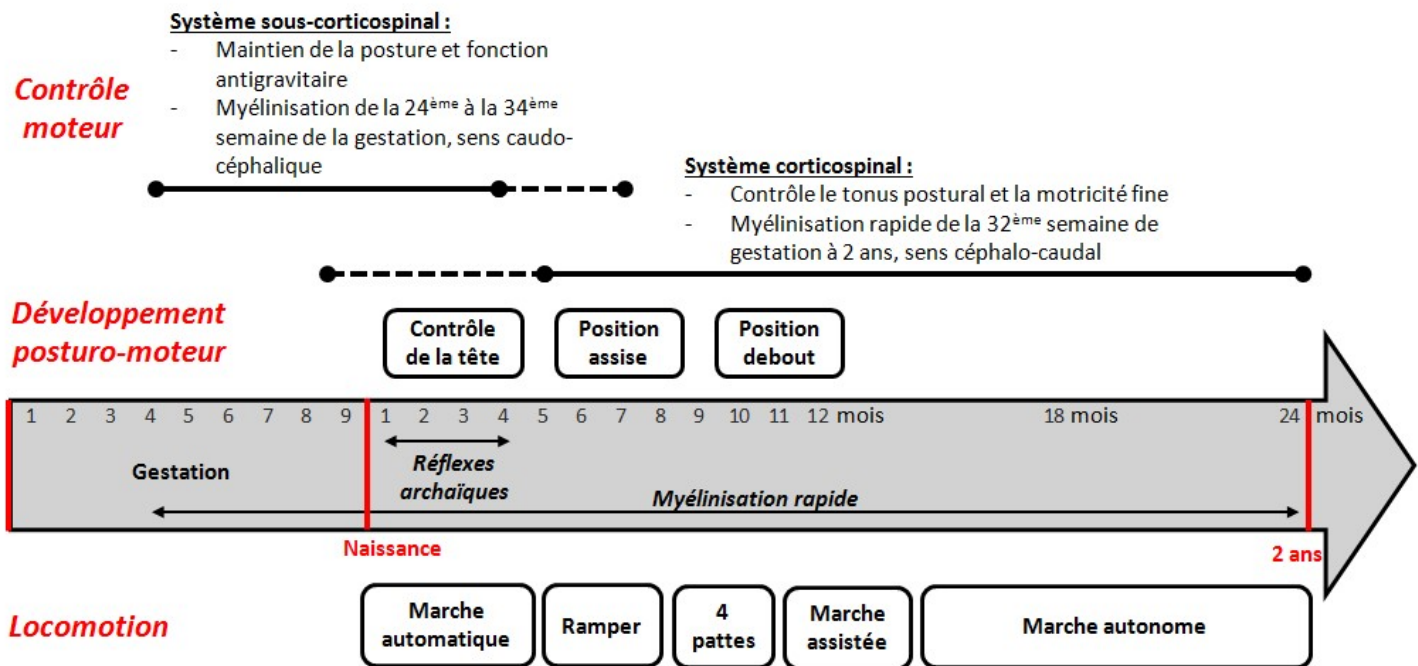


Figure 4.1 Maturation du système nerveux central du début de la gestation au 24<sup>ème</sup> mois de vie et développement posturo-moteur

#### De la motricité réflexe à la motricité volontaire

On distingue deux grands systèmes impliqués dans le contrôle moteur (Martin 2005) (Fig 3.1) :

- d'une part le système sous-cortical. Issu du tronc cérébral, il assure un rôle essentiel dans le maintien de la posture et la fonction antigravitaire (tonus des muscles extenseurs du tronc et des membres). Sa myélinisation s'étale de la 24<sup>ème</sup> à la 34<sup>ème</sup> semaine de gestation et s'effectue dans le sens caudo-céphalique.
- d'autre part le système corticospinal ou pyramidal qui comprend les zones corticales motrices. Il contrôle le tonus postural (modère les réactions posturales en hyper-extension) et la motricité fine. Sa myélinisation est rapide de la 32<sup>ème</sup> semaine de gestation jusqu'à l'âge de 2 ans, puis s'étale jusqu'à l'âge de 20 ans.

Au cours de la vie fœtale et au moment de la naissance, la motricité réflexe du système sous-cortical prédomine largement sur le système corticospinal. Le processus d'encéphalisation, rapide au cours des deux premières années de vie, va inverser cette tendance au profit du système corticospinal. Progressivement la motricité volontaire prend le pas sur la motricité réflexe.

Les réflexes archaïques, ou réflexes primaires, sont définis comme des mouvements automatiques involontaires stéréotypés, produits en réponse à certains stimuli spécifiques. Ils sont observés au cours de l'examen clinique du nouveau-né comme indicateurs de la maturation du SNC. On peut citer le réflexe de succion, le réflexe de Moro, le réflexe de grasping, le réflexe tonique asymétrique du cou, le réflexe de foussement. Issus du fonctionnement du système sous-cortical, leur présence est physiologique au cours des premiers mois de la vie. Vers l'âge de 3-4 mois et en l'absence d'anomalies du développement neuro-moteur, la plupart de ces réflexes disparaissent au profit de l'apparition de la motricité dirigée (Amiel-Tison 2008) (Fig. 3.1). Qu'en est-il du réflexe de marche automatique ?

#### Développement posturo-moteur au cours de la première année de vie

Le développement posturo-moteur du nourrisson se caractérise par l'acquisition progressive et simultanée d'habiletés posturales et motrices lui permettant d'agir et de se déplacer et dans son environnement. Trois lois définissent le cadre spatio-temporel de la maturation posturo-motrice du nourrisson (Gesell 1946):

1. *la loi céphalo-caudale. Le développement du contrôle postural progresse du haut vers le bas du corps: muscles du visage, puis cervicaux, puis érecteurs du rachis et abdominaux, puis muscles des membres inférieurs.*
2. *la loi proximo-distale. Le contrôle volontaire s'effectue des segments les plus proches de l'axe du corps (ceintures scapulaire et pelvienne) vers les segments les plus éloignés (mains, pieds).*
3. *la loi de différenciation. Elle fait évoluer la motricité d'une motricité globale et généralisée aux 4 membres, à une motricité de plus en plus localisée et précise.*

*Malgré ce cadre spatio-temporel, on observe une importante variabilité inter-individuelle dans l'organisation du développement posturo-moteur du nourrisson. En effet, différents facteurs intrinsèques et extrinsèques interfèrent avec ces acquisitions (Teulier, Lee, et Ulrich 2015). Parmi les facteurs intrinsèques peuvent être cités le stade de maturation du SNC, la croissance du squelette, le développement sensoriel du nourrisson, son développement cognitif mais aussi son tempérament. Concernant les facteurs extrinsèques, le cadre de vie, le cadre familial ou encore l'éducation reçue sont autant de facteurs pouvant moduler les acquisitions posturo-motrices au cours de la première année de vie. Ainsi, le développement posturo-moteur suit un certain nombre d'étapes, plus ou moins rapidement d'un individu à l'autre. Les âges moyens d'acquisition de ces différentes habiletés posturo-motrices constituent des points de repères chronologiques pour le cliniciens permettant de déceler d'éventuelles anomalies du développement d'ordre neurologique, anatomique ou physiologique (Fig 3.1 et 3.2).*

#### Développement postural: de tenir sa tête à tenir debout

*Au cours de la première année de vie, le développement postural du nourrisson l'amène à se redresser jusqu'à la position debout. Cette verticalisation progressive s'effectue en parallèle de l'évolution de son tonus axial caractérisé à la naissance par une hypertonie des membres et une hypotonie du tronc. Le développement postural se développe dans le sens céphalo-caudal avec comme point de départ la contraction des muscles cervicaux contre la pesanteur:*

- *Contrôle de la tête: la tenue de tête est la première habileté posturale à se mettre en place: allongé sur le ventre l'enfant est progressivement capable de décoller sa tête du sol (zone I de Gesell à 8 semaines) (Fig.3.2)*
- *Position assise: à 6 mois l'enfant tient assis avec appui des mains, entre 7 et 8 mois il tient assis sans appui*
- *Position debout: vers 9 mois l'enfant tient seul debout en s'accrochant à un support, puis entre 10 et 12 mois est capable de tenir debout sans soutien (Sutherland et al. 1980)*

#### Développement moteur: les niveaux d'évolution moteurs

*Les Niveaux d'Evolution Moteurs (NEM) sont définis par Le Métayer par une succession de redressements, maintiens, enchainements, déplacements du décubitus dorsal vers la station debout (Le Métayer 2010). L'évolution neuro-motrice du décubitus dorsal vers la station debout n'est pas linéaire: elle est composée de différents stades entrecoupée de phases de pratique et d'entraînement. La pratique et la maîtrise du NEM en cours d'apprentissage est un pré-requis au passage au niveau supérieur. Par exemple, la pratique quotidienne du déplacement à quatre pattes permet la progression dans la coordination entre les quatre membres et l'augmentation de la masse musculaire des muscles de la ceinture pelvienne. Cet entraînement potentialise l'acquisition du NEM supérieur : la position à genoux dressés puis la marche à genoux dressés.*

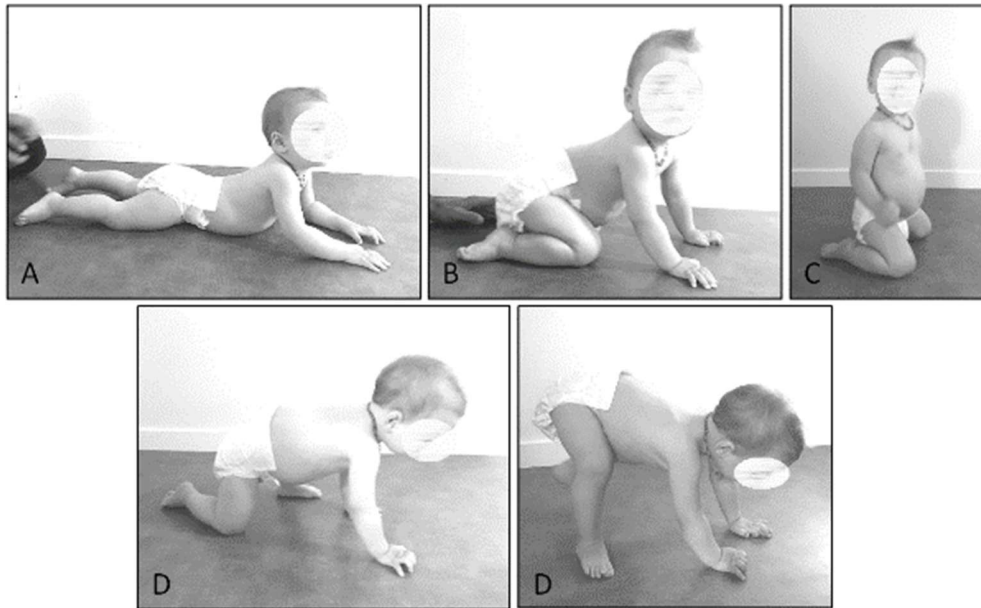


Fig. 4.2 Niveaux d'Evolution Moteurs: A-sphinx, B-petit-lapin, C-assis-talon, D-transition vers la position debout

La verticalisation progressive de la station allongée à la station debout permet au nourrisson d'appréhender progressivement l'impact de la pesanteur sur son équilibre et ses mouvements. En effet, l'évolution d'un NEM à l'autre implique l'élévation du centre de gravité et la diminution du polygone de sustentation. Chronologiquement, on verra apparaître chez un nourrisson au développement psychomoteur normal : les retournements du ventre au dos et du dos au ventre entre 5 et 7 mois, le déplacement en reptation entre 9 et 10 mois, la marche à quatre pattes entre 9 et 11 mois puis la marche en se tenant à un support à partir de 11 mois (Gesell 1946; Le Métayer 2010) (Fig.3.2 et 3.3).

8 sem	Zone 1	9 à 10 mois	Se met debout en s'aidant fortement des bras
12 sem	Zone 2	9 à 11 mois	Marche à quatre pattes
16 sem	Zone 3	10 mois	Marche en poussant un objet
20 sem	Appui sur les membres supérieurs étendus (phoque)	11 mois	Réactions parachute postérieures
4 à 6 mois	Tiré-assis	11 mois	Se déplace debout le long d'un appui
6 mois	Tient assis avec l'appui des mains	11 mois	Marche tenu par les deux mains
5 à 7 mois	Retournement du dos sur le ventre	12 mois	Marche tenu par une seule main
7 mois	Réactions parachute antérieures	13 à 15 mois	Marche seul
7 à 8 mois	Tient assis sans appui	18 mois	Tombe rarement, fait quelques pas en arrière
7 à 8 mois	Tient debout à l'appui lorsqu'on l'y place	18 mois	Se met debout sans l'aide des mains
8 à 9 mois	Tient longtemps assis au sol, les jambes allongées	18 mois	Court maladroitement
9 mois	Tient debout à l'appui avec le tronc redressé	18 mois	Monte l'escalier tenu par une main
9 mois	Passe en petit lapin	18 mois	Grimpe partout
9 mois	Passe à genoux dressé avec appui des mains	21 mois	Descend l'escalier tenu par une main
9 à 10 mois	Reptation	21 mois	Monte l'escalier seul en tenant la rampe
9 à 10 mois	Réactions parachute latérales	21 mois	Marche en terrain irrégulier

Fig. 4.3 Ages d'apparition des stades moteurs (âges statistiques moyens) (Gesell 1946)





### **1.3.2 Maturation des trois grands systèmes impliqués dans la fonction d'équilibration, de la petite enfance à l'adolescence**

Les trois grands systèmes responsables du contrôle postural sont le système sensoriel, le système nerveux central et le système musculo-squelettique. Ils se développent et mûrissent jusqu'au début de l'âge adulte, à des rythmes différents et de manière non linéaire.

#### **1.3.2.1 Maturation des systèmes visuel, somato-sensoriel et vestibulaire**

Le développement de la fonction d'équilibration implique la maturité des systèmes sensoriels visuel, somato-sensoriel et vestibulaire. En effet, le contrôle postural est une tâche multisensorielle complexe basée sur diverses sources d'informations. La maturation de ces systèmes sensoriels joue un rôle primordial dans le développement de la fonction d'équilibration, et la contribution propre de chacun varie de la petite enfance à l'adolescence. Dans l'ordre chronologique, le système visuel, puis le système somato-sensoriel, et enfin le système vestibulaire, atteignent tour à tour la maturité nécessaire à la réalisation de la fonction d'équilibration (Mallau, Vaugoyeau, et Assaiante 2010; Sá et al. 2018).

##### 1.3.2.1.1 Maturation du système visuel

La vision étant une afférence sensorielle facile à manipuler y compris chez de tous petits enfants, de nombreuses publications ont mis en évidence son rôle majeur dans le contrôle de l'équilibre debout pour l'Humain, et de manière plus marquée chez les enfants et adolescents que chez les adultes. En effet, si les entrées somato-sensorielles sont primaires pour le contrôle postural chez les adultes, ce sont bien les repères visuels qui jouent un rôle central dans les tâches posturales et locomotrices pour les enfants et les adolescents (Mallau, Vaugoyeau, et Assaiante 2010; Houwen et al. 2008; Bednarczuk et al. 2021; Walicka-Cupryś et al. 2022; Ferber-Viart et al. 2007; A. Shumway-Cook et Woollacott 1985; C. Assaiante et Amblard 1992; Sá et al. 2018). D'ailleurs, on observe chez des enfants présentant des troubles visuels ou une cécité, des troubles plus ou moins graves des capacités posturales d'équilibration (A.-A. Ebrahimi et al. 2017; Walicka-Cupryś et al. 2022; Houwen et al. 2008; Zipori et al. 2018).

Différentes pistes permettent d'expliquer cette importante dépendance visuelle des enfants et adolescents pour le contrôle postural. Tout d'abord, la vision est le premier des systèmes sensoriels à être complètement mature, autour de l'âge de 12 ans (Peterson, Christou, et Rosengren 2006; Walicka-Cupryś et al. 2022; Rinaldi, Polastri, et Barela 2009). Aussi, depuis leur naissance, les enfants et adolescents sont soumis à d'importants changements corporels, alors les repères visuels constituent le premier référentiel sensoriel non affecté par la croissance musculo-squelettique (Mallau, Vaugoyeau, et Assaiante 2010). Par ailleurs, la vision tient un rôle déterminant dans la perception de la verticale, repère primordial pour les plus petits pour apprendre à se tenir debout contre pesanteur (D. N. Lee et Aronson 1974). Enfin, la dépendance visuelle pour le maintien de l'équilibre postural chez l'enfant diminue avec l'âge, de façon non linéaire. Des pics de dépendance visuelle sont décrits à l'âge d'environ 6 ans, 8 ans et 15 ans (Mallau, Vaugoyeau, et Assaiante 2010).

##### 1.3.2.1.2 Maturation du système somato-sensoriel

Dès la naissance, les entrées sensorielles sont cruciales pour le développement du système nerveux car elles permettent la bonne organisation synaptique du cerveau. Les informations somato-sensorielles (toucher, proprioception et capacité haptique) sont particulièrement importantes pour l'apprentissage moteur dans les premiers stades du développement et constituent la base pour l'acquisition de compétences cognitives plus complexes. Ainsi, des troubles de la sensibilité somatosensoriel ont pu être associés à des déficits de communication, de motricité et de compétences sociales (Cascio 2010; Song et al. 2021; Zarkou et al. 2020). Cependant, les tests et échelles d'évaluation du système somato-sensoriel

dans la population pédiatrique sont rares, présentent des qualités psychométriques discutables, et ont souvent été conçus spécifiquement à des fins de recherche et peuvent avoir une utilité limitée dans la pratique clinique (Marsico et al. 2022; Connell et Tyson 2012; Taylor et al. 2016).

Plusieurs protocoles de vibrations tendineuses chez des enfants et adolescents (R. J. Peterka et Black 1990; Hytönen et al. 1993) ont mis en évidence que la maturation du système somato-sensoriel dans le cadre du contrôle postural se produit tardivement au cours du développement sensori-moteur. Les informations proprioceptives commencent à être nécessaires au maintien de la posture à partir de l'âge 6 ans (Westcott et Burtner 2004; Taylor et al. 2016) et cette maturation se poursuit jusqu'à l'adolescence (Mallau, Vaugoyeau, et Assaiante 2010; Sparto et al. 2006; Goble et al. 2005). En effet, Gobel et al. ont examiné l'impact du recalibrage des schémas corporels internes en réponse à la croissance pubertaire entre les âges de 11 à 15 ans pour les jeunes femmes, et de 13 à 17 ans pour les jeunes hommes. De même, Viel et ses collègues ont suggéré que les perturbations du schéma corporel pouvaient causer une période de négligence proprioceptive transitoire chez les adolescents âgés de 14 à 15 ans. Les changements corporels importants qui se produisent pendant cette période peuvent amener les sujets à sous-utiliser les informations fournies par la voie proprioceptive et à surutiliser d'autres systèmes sensoriels, tels que la vision, pour orienter et stabiliser leur corps dans l'espace (Viel, Vaugoyeau, et Assaiante 2009; Mallau, Vaugoyeau, et Assaiante 2010; Taylor et al. 2016).

#### **1.3.2.1.3 Maturation du système vestibulaire**

Différents auteurs décrivent que les informations vestibulaires ne sont intégrées qu'à partir de l'âge de 12 ans concernant le contrôle postural (Young 2015; Nandi et Luxon 2008; Sá et al. 2018). Aussi, dans une étude incluant plus de 150 enfants entre 6 et 12 ans, Peterson et al. montrent que seuls ceux âgés de 12 ans utilisent les informations vestibulaires comme le font les adultes (Peterson, Christou, et Rosengren 2006). De leur côté, Steindl et al. estiment que la capacité à utiliser pleinement les stimuli vestibulaires et visuels dans le contrôle de l'équilibre est atteinte à partir de 15 ans (Steindl et al. 2006).

#### **1.3.2.2 Maturation des processus centraux de la fonction d'équilibration au cours de l'ontogenèse**

Les processus centraux impliqués dans le contrôle postural (traitement des informations sensorielles, production de stratégies posturales d'équilibration) sont le siège de nombreux phénomènes de maturation au cours de l'ontogenèse. Sur le plan posturographique, il en résulte une diminution des oscillations posturales avec l'âge, depuis les prémices de l'équilibre debout, jusqu'à l'âge adulte (Sá et al. 2018; Verbecque et al. 2016; Micarelli et al. 2020; Hao et al. 2021; Kiefer et al. 2021).

##### **1.3.2.2.1 Pondération, repondération et gestion des conflits sensoriels**

Les enfants, tout comme les adolescents et les adultes, utilisent des informations sensorielles d'origines visuelles, vestibulaires et proprioceptives pour contrôler leur posture, mais leur contributions relatives varient au cours de l'ontogenèse (C. Assaiante et Amblard 1995; Mallau, Vaugoyeau, et Assaiante 2010). Shumway-Cook et al. suggèrent un développement de la pondération des systèmes sensoriels pour la fonction d'équilibration en trois paliers : avant l'âge de 3 ans les enfants sont très dépendants de la vision, cette dominance s'estompe entre 4 et 6 ans mais ils ne sont pas encore capables de résoudre un conflit sensoriel en relation à une perturbation et ils développent entre 7 et 10 ans la capacité de réguler des conflits sensoriels (A. Shumway-Cook et Woollacott 1985; Sá et al. 2018). Par ailleurs, plusieurs auteurs ont émis l'hypothèse que les améliorations du contrôle postural observées chez les enfants au cours du développement, pourraient être en partie expliquées par une meilleure capacité de repondération sensorielle, permettant d'utiliser simultanément les informations de toutes les modalités sensorielles (Bair et al. 2012; Rinaldi, Polastri, et Barela 2009; Mallau, Vaugoyeau, et Assaiante 2010).

### 1.3.2.2 Evolution des stratégies posturales d'équilibration

Le maintien de l'équilibre au cours de la station debout et de la déambulation, nécessite l'utilisation d'un référentiel corporel stable. Assaiante et al. ont étudié le développement de la stabilisation segmentaire au cours de l'ontogenèse, soit le choix des segments anatomiques de référence. Trois phases de développement sont mises en évidence, qui coïncident avec les trois paliers décrits précédemment (C. Assaiante et Amblard 1993; 1995; Christine Assaiante 1998) (Figure 1.3-1) :

- ✓ Entre 3 et 6 ans, l'enfant adopte une stratégie de stabilisation de la tête sur l'espace afin de garder la stabilité des systèmes visuel et vestibulaire. On observe alors une stratégie dite « en bloc » afin de réduire le nombre de DDL à contrôler simultanément. Durant cette période, les enfants utilisent la stratégie de stabilisation de la tête sur l'espace seulement lorsque la station debout est effectuée sur un sol stable. Mais lorsque le sol est un support instable ou étroit, les enfants tendent à se raidir, en stabilisant la tête non plus sur l'espace mais sur le tronc.
- ✓ A partir de 7-8 ans, l'enfant devient capable d'adopter la stratégie de stabilisation de la tête sur l'espace, même dans des situations d'équilibre précaire (marche sur une support étroit, passage d'obstacles...). Il abandonne également la stratégie « en bloc » pour adopter une stratégie « articulée » qui consiste à contrôler de manière indépendante une succession de segments corporels.
- ✓ A partir de 8-9 ans, l'enfant adopte une stabilisation préférentielle de la tête sur l'espace de façon systématique, dans toutes les positions et malgré les éventuelles difficultés d'équilibre. Cette dernière phase, dite de maturité, est caractéristique des stratégies posturales observées chez les adultes.

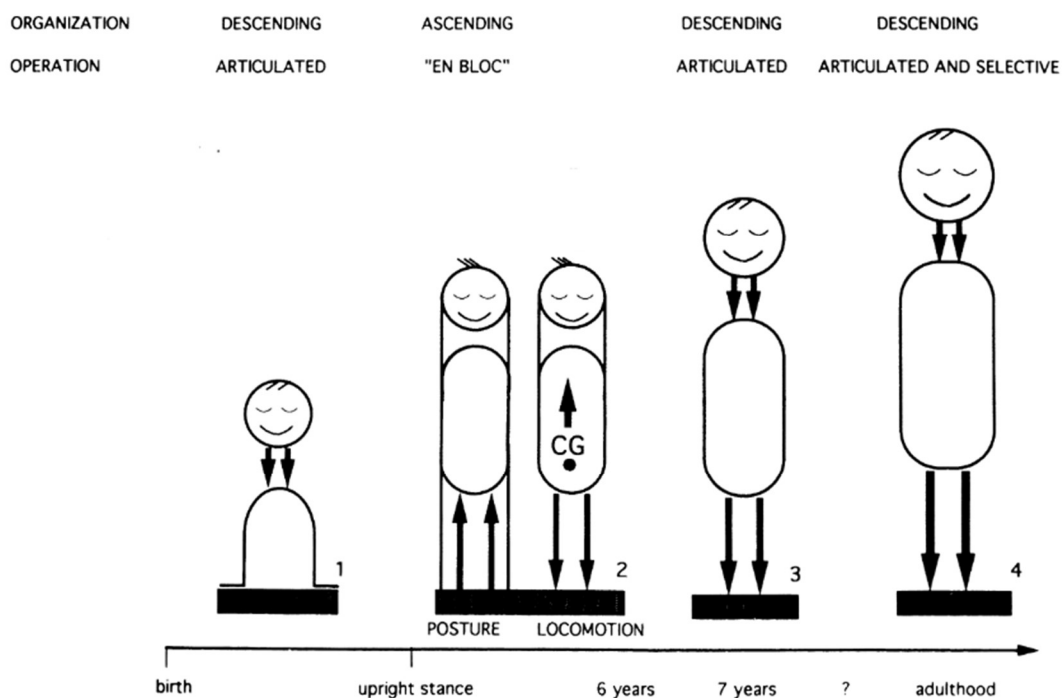


Figure 1.3-1 : Evolution des stratégies de contrôle postural au cours de l'ontogenèse (C. Assaiante et Amblard 1995)

Les nourrisson, enfants, adolescents et adultes, adoptent différentes stratégies d'équilibration qui sont basées sur deux principes fonctionnels majeurs liés à l'organisation spatiale. Le premier principe concerne la sélection d'un référentiel stable sur lequel repose le contrôle de l'équilibre, tandis que le second principe concerne la progression de la maîtrise des DDL articulaires. Le choix du segment anatomique servant de référence stabilisée, ainsi que les types de couplage entre les articulations, dépendent des contraintes dynamiques qui déterminent la difficulté d'une tâche motrice, des caractéristiques de l'environnement et des différentes périodes de développement de l'individu (C. Assaiante et Amblard 1993; 1995; Mallau, Vaugoyeau, et Assaiante 2010).

### **1.3.2.2.3 Mise en place des Ajustements Posturaux Anticipateurs**

Au cours du développement du contrôle postural, les enfants développent d'abord un répertoire de stratégies posturales en Feedback Control, avant d'être capable de produire des Ajustements Posturaux Anticipatoires, appropriés aux caractéristiques de la perturbation posturale (Christine Assaiante et al. 2005; Haas et al. 1989; Schmitz, Martin, et Assaiante 2002; Westcott et Burtner 2004). Pour expliquer la maturation plus tardive du Feedback Control, Ledebt et al. (1998) invoquent la dualité entre les deux fonctions principales du Feedback Control, soient la réduction du déséquilibre et la création anticipée des conditions pour effectuer le mouvement de manière efficace (Ledeht, Bril, et Brenière 1998). Aussi, une étude sur le contrôle moteur chez des enfants en position debout a réussi à isoler le développement du Feedback Control de celui du Feedforward Control (Westcott et Burtner 2004). Les auteurs suggèrent une maturité du système compensatoire vers 7-10 ans alors qu'elle serait atteinte vers 9-12 ans pour le système anticipatoire. Similairement, Schmitz et al. (2002) estiment que le système de Feedback Control, n'est pas mature avant l'âge de 8 ans (Schmitz, Martin, et Assaiante 2002). Hay et Redon (1999) estiment que le contrôle de l'amplitude des APA est mature vers 9-10 ans alors que le contrôle du timing de déclenchement est immature jusqu'à au moins 10 ans (Hay et Redon 1999). Le paramètre du timing de déclenchement de la réaction anticipatoire semble être le dernier à atteindre sa maturité (Assaiante et al., 2005).

### **1.3.2.3 Croissance et maturation du système musculo-squelettique**

De la naissance à l'âge adulte, le système musculo-squelettique est le siège d'un important développement, qui associe croissance (augmentation des dimensions des os et des muscles) et maturation (modifications structurelles du système musculo-squelettique). Ces deux processus sont étroitement dépendants de facteurs génétiques, hormonaux, environnementaux, nutritionnels, psycho-affectifs.

#### **1.3.2.3.1 La croissance et la maturation des os des membres inférieurs et du tronc impactent la position du Centre de Gravité et la surface du polygone de sustentation**

La croissance osseuse est un phénomène complexe et non linéaire. En effet, de la naissance à l'âge adulte, on peut diviser la croissance du squelette en trois phases distinctes. D'abord jusqu'à l'âge de 2 ans, on observe une phase de croissance rapide, et en particulier au cours de la première année de vie (la taille des nourrissons passe en moyenne de 50 cm à la naissance à 75 cm à 12 mois). Puis de l'âge de 2 ans jusqu'au début de la puberté, la croissance présente un accroissement annuel assez constant (gain de taille d'environ 5 à 6 cm par an jusqu'à la puberté). Enfin, un pic de croissance survient au moment de la puberté. Pour les filles celle-ci survient en moyenne à l'âge de 10–11 ans. Ce pic dure jusqu'aux premières règles, moment où la croissance ralentit puis s'arrête, en général entre 14–16 ans. Chez les garçons, les premiers signes de puberté et le pic de croissance qui l'accompagne surviennent vers l'âge de 12 ans (Dimeglio 2001; Onis 2008; Hussain 2021).

La maturation osseuse correspond aux mécanismes d'évolution morphologiques et structurels des os, permettant de rendre le squelette plus robuste et efficient. Concernant le tronc et les MI, la maturation osseuse permet la mise en place d'une statique posturale permettant à l'Humain de rester debout pendant de nombreuses heures, avec une faible consommation énergétique (Dimeglio 2001)(Figure 1.3-2). Parmi ces modifications structurelles et morphologiques, on peut observer entre autres, au cours de l'enfance et de l'adolescence:

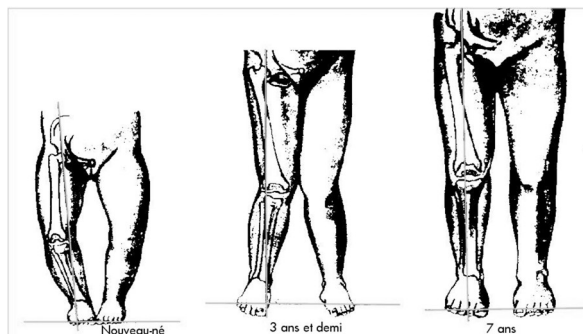
- L'apparition des courbures rachidiennes : lordoses cervicale et lombaire, cyphose thoracique (Labrom 2007)
- La formation de l'acétabulum de l'articulation coxo-fémorale (M. C. Lee et Ebersson 2006)
- Concernant le fémur, la fermeture de l'angle cervico-diaphysaire et la réduction de l'antéversion fémorale (Scorcelletti et al. 2020)
- Concernant le tibia, le passage d'une torsion tibiale interne vers une torsion tibiale externe (Fabry, Cheng, et Molenaers 1994)
- L'évolution du morphotype frontale des membres inférieurs, de genu-varum à la naissance, à genu-valgum entre 2 ans et 7 ans (W. B. Greene 1994)

✓ Dans le plan frontal:

A la naissance: GENU-VARUM qui se corrige progressivement et atteint l'axe neutre vers 2 ans.

De l'âge de 2 ans à 7 ans: GENU-VALGUM (maximum à l'âge de 3-4 ans).

De l'âge de 7 ans à la fin de la puberté: évolution en fonction du sexe (tendance au GENU-VALGUM chez les filles, au GENU-VARUM chez les garçons).



✓ Dans le plan horizontal:

L'angle de progression du pied au cours de la marche est issu de l'addition des torsions diaphysaires fémorales et tibiales. Toutes deux évoluent au cours de la croissance de l'enfant.

ANTE-TORSION FEMORALE: de 35° à la naissance, diminue en moyenne de 1° par an jusqu'à la fin de la croissance, comprise entre 10 et 15° à l'âge adulte

TORSION TIBIALE: nulle à la naissance, puis une torsion tibiale EXTERNE apparaît progressivement (d'environ 5° à 5 ans, jusqu'à 30° à la fin de la croissance).

✓ Arche interne du pied:

PIED PLAT PHYSIOLOGIQUE (associé au valgus de l'arrière-pied) observé à la naissance, qui se creuse à partir de l'âge de 2 ans.

Figure 1.3-2 : Evolution morphologique du squelette des membres inférieurs de la naissance à l'âge adulte, Figure issue Chapitre 4 « Acquisition, développement et altérations de la marche à travers les âges » (Delafontaine 2018)

La croissance et la maturation des os du tronc et des membres inférieurs impactent non seulement la position du Centre de Gravité, mais aussi la surface et la forme du polygone de sustentation. Par exemple, un morphotype frontal en genu-varum est automatiquement associé à des pieds rapprochés en position debout, alors qu'un morphotype frontal en genu-valgum est plus volontiers associé à des pieds écartés l'un de l'autre. Aussi, une antéversion fémorale importante, associée ou non à une torsion tibiale interne, peut être responsable d'un angle de progression interne des pieds (Figure 1.3-3).

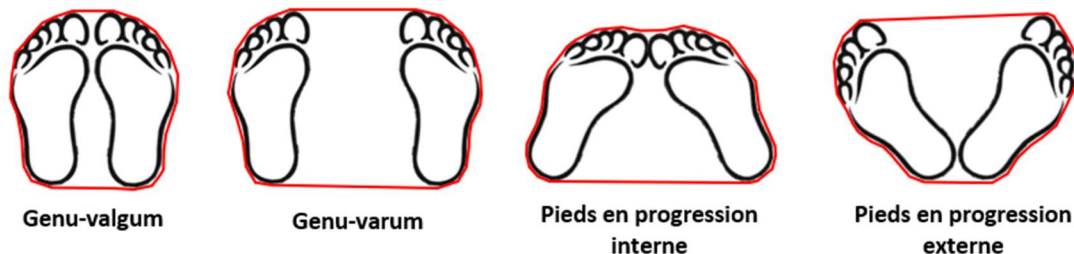


Figure 1.3-3 : Modification de la surface et de la forme du polygone de sustentation en fonction des caractéristiques morphologiques du squelette des membres inférieurs

#### 1.3.2.3.2 La croissance et la maturation des os du pied impactent la surface du polygone de sustentation

Le pied connaît une croissance très rapide pendant les 5 premières années de vie. En particulier entre 0 et 2 ans, il grandit d'environ 2 cm par an. Il atteint sa taille définitive vers l'âge de 14 ans. Meyvaci et al. décrivent des liens entre paramètres anthropométrique des pieds et capacités d'équilibration statique et dynamique (Meyvaci et al. 2020). En effet, le pied représente l'interface directe entre l'Humain debout et la surface sur lequel il se tient, sa taille est donc un facteur déterminant dans le contrôle postural. Outre sa taille, le pied se caractérise également par sa forme et sa voûte plantaire, qui apparaît au cours de la petite enfance. Formée par les os, les muscles, les tendons et les ligaments du pied, la voûte plantaire permet de stabiliser le pied au sol et de répartir le poids corporel sur l'ensemble de la surface plantaire (S. Müller et al. 2012; Uden, Scharfbillig, et Causby 2017; Waseda et al. 2014). En 2019, une étude a montré une corrélation significative entre les variables morphologiques du pied dans une population d'adolescents asymptomatiques, et leurs paramètres posturographiques en station debout (Szczepanowska-Wolowiec et al. 2019).

#### 1.3.2.3.3 Les proportions et compositions corporelles impactent la position du Centre de Gravité et les déplacements du Centre de Pression

Depuis la vie fœtale jusqu'à l'âge adulte, les proportions du corps varient. L'exemple le plus marquant est celui de la proportion de la taille du crâne par rapport à la taille globale du squelette : à la naissance, la tête représente le quart de la taille totale, alors qu'à l'âge adulte elle représente 1/7 à 1/8 de la taille totale. A la naissance, la circonférence du crâne atteint environ 35 cm, soit déjà 61 % de sa taille adulte. D'autres parties du corps grandissent à des rythmes différents, ce qui s'associe à des changements graduels du ratio entre les diverses parties du corps. Entre la naissance et l'âge de 7 ans, les membres grandissent plus vite que le tronc, et le rapport vertex-pubis/pubis-talon passe de 1,7 à 1,5 à 12 mois, puis à 1,0 à partir de 7 ans (Hattori, Hirohara, et Satake 2011; Robbins 1928; Bogin et al. 2001; Gleiss et al. 2013).

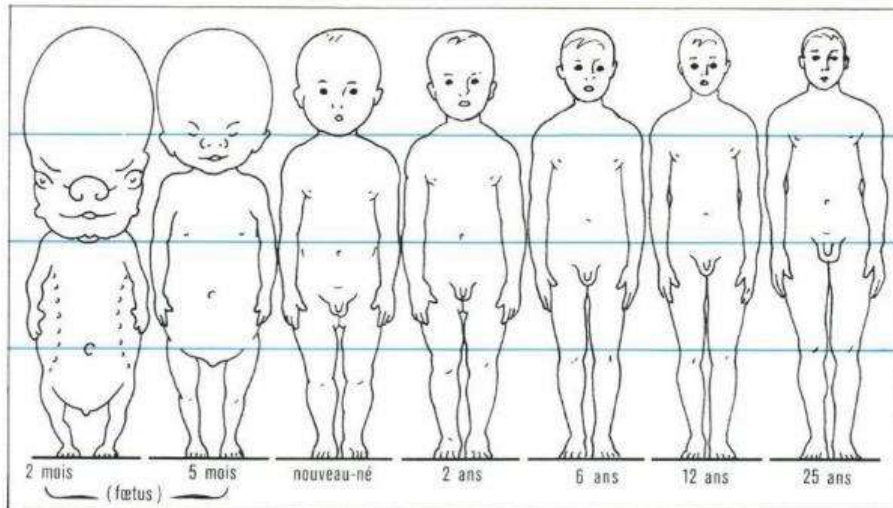


Figure 1.3-4 : Evolution des proportions du corps humain de la période foetale à l'âge adulte (Robbins 1928)

Les compositions corporelles en graisse, eau et muscles évoluent également de la naissance jusqu'à l'âge adulte. Cela impacte la répartition des masses autour du squelette, et automatiquement la position du CdG et les déplacements du CdP (Dinkel et al. 2017). Par exemple, le pourcentage de graisse corporelle passe de 13% à la naissance à 20 à 25% à 12 mois, décroît jusqu'à la préadolescence et remonte au moment de la puberté. L'eau corporelle elle représente 70% du poids du corps à la naissance, puis baisse jusqu'à 61% à 12 mois, pourcentage égal à celui observé chez l'adulte (Araújo et al. 2019).

## 1.4 Causes des troubles de l'équilibre d'enfants présentant une Paralysie Cérébrale de type spastique

*« Le rassurant de l'équilibre, c'est que rien ne bouge. Le vrai de l'équilibre, c'est qu'il suffit d'un souffle pour tout faire bouger. » (Julien Gracq)*

Sur le plan physiologique, l'équilibre se caractérise par une boucle de rétroaction complexe, dirigée par le SNC. Dans le cadre de la PC de type spastique, celle-ci est altérée aussi bien au niveau sensoriel, que central et musculo-squelettique. Ainsi, les causes des troubles de la posture et de l'équilibre chez les enfants avec PC spastique sont multiples, et souvent intriquées les unes avec les autres.

### 1.4.1 Causes sensorielles des troubles de l'équilibre associés à la Paralysie Cérébrale de type spastique

Plusieurs études ont permis de mettre en évidence des déficits sensoriels visuels, vestibulaires et proprioceptifs chez les enfants présentant une PC (Bleyenheuft et Gordon 2013; Sílvia Leticia Pavão et Rocha 2017; Sílvia Leticia Pavão et al. 2015; Almutairi, Cochrane, et Christy 2019). Concernant les informations proprioceptives aux MI, des difficultés de détermination de la position du genou et de la hanche ont été observées (Damiano et al. 2013). Aussi, Zarkou et al. ont décrit des déficits proprioceptifs cutanés plantaires et de l'articulation talo-crurale, en lien avec les capacités de contrôle postural debout et les capacités motrices globales chez ces enfants (Zarkou et al. 2020).

Par ailleurs, le traitement de l'information sensorielle implique l'enregistrement et la pondération des entrées afférentes, afin d'adapter la réponse motrice aux exigences environnementales. Hors, les lésions de la substance blanche présentes chez 45 % des enfants avec PC, sont susceptibles d'impacter le développement des régions corticales et thalamiques responsables du traitement de l'information sensorielle, aboutissant à une réduction des messages coordonnés du SNC aux zones motrices (Tsao et al. 2014; Reid et al. 2014). Aussi, on observe un dysfonctionnement du réseau sensori-moteur chez les enfants atteints de PC (en particulier des régions somatosensorielles corticales, pariétales et frontales), qui peut altérer le traitement des informations tactiles et somatosensorielles (Papadelis et al. 2014; Reid et al. 2014). Le traitement des informations visuelles et vestibulaires est également altéré chez ces enfants, entraînant des difficultés de modulation du contrôle postural (Wingert et al. 2010; Sílvia Leticia Pavão et al. 2015).

Enfin, les troubles moteurs associés à la PC limitent le niveau d'activité et la capacité de ces enfants à découvrir le monde qui les entoure. Cela peut accentuer les déficits de traitement sensoriel observés chez ces enfants, en restreignant l'exploration sensorielle de l'environnement (Bleyenheuft et Gordon 2013; Sílvia Leticia Pavão, Barbosa, et al. 2014; Liao et Hwang 2003).

### 1.4.2 Causes centrales des troubles de l'équilibre associés à la Paralysie Cérébrale de type spastique

Le syndrome pyramidal est communément mis en cause dans les troubles de l'équilibre observés chez les enfants avec PC spastique. Cependant, bien que de nombreuses études aient démontré que la spasticité a un effet négatif significatif sur les paramètres spatio-temporels et la cinématique de la marche chez ces enfants (Papageorgiou et al. 2019; Multani et al. 2019; Bowal et al. 2021), les liens entre spasticité et fonction d'équilibration ne sont pas clairement établis. Chez les adultes ayant subi un AVC, quelques études ont examiné la relation entre la spasticité et le déplacement du centre de pression en position debout et ont démontré un moins bon contrôle postural chez les individus présentant des niveaux plus élevés de spasticité aux muscles des MI (Phadke et al. 2014; Singer, Nishihara, et Mochizuki 2016; Rahimzadeh Khiabani et al. 2017). D'autres études, également menées chez des adultes post AVC,



n'ont pas retrouvé de corrélations entre la spasticité et les variables liées à l'équilibre (Mahmoudzadeh et al. 2021; Amatya et al. 2019). Pour ce qui est des enfants avec PC, il est établi que la rhizotomie dorsale sélective, neuro-chirurgie qui vise à réduire la spasticité, améliore également les paramètres posturographiques (Rumberg et al. 2016).

Pour ce qui est de la faiblesse musculaire, Roncesvalles et al. ont mené une étude EMG chez des enfants avec PC et leurs pairs au développement typique au cours de perturbations de l'équilibre en position debout. Leurs résultats montrent que le frein principal au contrôle de l'équilibre chez les enfants PC semble être la faiblesse de contraction des muscles posturaux agonistes (Roncesvalles, Woollacott, et Burtner 2002). Ces mêmes auteurs ajoutent que pour les enfants au développement typique, l'amplitude de la réponse musculaire augmente avec des perturbations plus importantes/plus rapides, alors que ce n'est pas le cas chez les enfants avec PC. Par ailleurs, la comparaison des propriétés d'excitabilité des nerfs moteurs entre des adultes avec et sans PC montre des anomalies de polarisation/dépolarisation des axones croissantes avec le niveau de GMFCS, chez les adultes avec PC (Klein, Zhou, et Marciniak 2015).

Pour compléter la triade pyramidale et concernant les troubles de la commande, une co-contraction accrue est observée en situation d'équilibre debout chez les enfants avec PC, entraînant une coordination musculaire plus lente et moins organisée que chez les enfants au développement typique (L. M. Nashner, Shumway-Cook, et Marin 1983), ainsi qu'un temps plus long de stabilisation suite à une perturbation posturale (Burtner, Qualls, et Woollacott 1998; Anne Shumway-Cook et al. 2003). Aussi, comparativement à leurs pairs sans troubles neuro-moteurs, les enfants avec PC présentent des difficultés à adapter leur réponse musculaire à l'amplitude de la perturbation (Crenshaw et al. 2020).

Enfin, les Ajustements Posturaux Anticipatoires (APA) jouent un rôle important dans la réalisation de nombreuses activités nécessitant le maintien de la posture debout. Girolami et al. les ont étudiés et comparés chez des enfants au développement typique, et chez des enfants avec PC, de topographie unilatérale et bilatérale. L'activité électromyographique de six muscles du tronc et des MI ainsi que le déplacement du centre de pression (COP) ont été enregistrés. Les enfants atteints de CP sont capables de générer des APA spécifiques aux caractéristiques de la perturbation et les déplacements du COP qui en découlent sont semblables à ceux décrits chez les adultes et les enfants ayant un développement moteur typique. Cependant, les enfants avec diparésie spastique ne peuvent pas générer des APAs de la même ampleur que ceux des enfants avec hémiparésie ou ceux de leurs pairs au développement typique (Girolami, Shiratori, et Aruin 2011). Avec un protocole expérimental semblable, Bigongiari et al. observent que les enfants avec PC présentent un plus haut niveau de co-activation musculaire au cours de la tâche de préhension que les enfants au développement typique, et soulignent une corrélation positive entre l'activité musculaire et l'âge pour le groupe témoin, mais pas chez les enfants avec PC (Bigongiari et al. 2011). Aussi, il est possible que les enfants avec PC présentent des déficits de contrôle anticipatifs, car l'exploration environnementale limitée au début de leur vie ne leur permet pas de développer des modèles internes appropriés pour une réponse motrice optimale (Butti et al. 2019; Fontes et al. 2017).

### 1.4.3 Causes musculo-squelettiques des troubles de l'équilibre associés à la Paralyse Cérébrale de type spastique

#### 1.4.3.1 Troubles musculo-squelettiques secondaires associés à la PC spastique

Dans la PC de type spastique, les spécificités des muscles striés squelettiques, les troubles musculo-squelettiques secondaires, les modifications de l'alignement postural qui en découlent, et de la surface d'appui sous les pieds, sont autant de facteurs pouvant altérer le fonctionnement de la fonction d'équilibration (H. K. Graham et al. 2016; 2021).

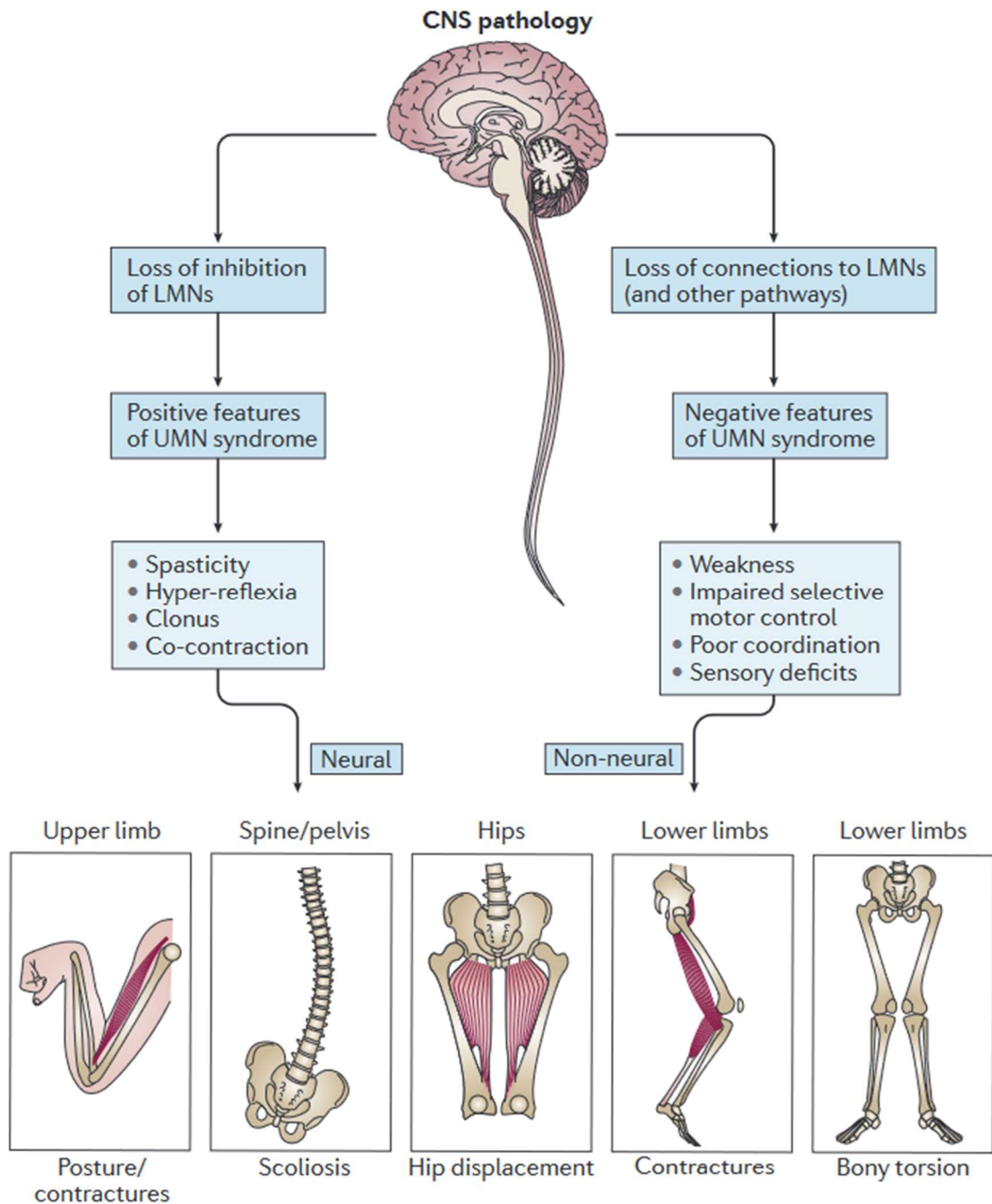


Figure 1.4-1 : Troubles musculo-squelettiques secondaires associés au syndrome pyramidal chez les enfants et adolescents avec PC de type spastique (H. K. Graham et al. 2016)

#### 1.4.3.1.1 Propriétés des muscles striés squelettiques des enfants avec PC spastique

##### ✓ Propriétés biomécaniques des muscles spastiques et de leurs tendons

Comme observé dans les suites d'un AVC chez l'adulte (Pradines et al. 2019), la PC de type spastique implique une modification secondaire des propriétés mécaniques des muscles striés squelettiques et de leurs tendons:

- Dès l'âge de 15 mois les muscles striés squelettiques d'enfants PC présentent un volume réduit jusqu'à 40%, sont plus courts et présentent moins de sarcomères en série par rapport à la moyenne observée chez des enfants au développement typique (Handsfield et al. 2022). Dans les fibres musculaires, le nombre de cellules satellites est diminué de 40 à 70 %. La régénération musculaire altérée est alors associée à une expansion de la matrice extracellulaire et à une expression accrue des gènes pro-inflammatoires ; les muscles qui en résultent sont plus petits, plus rigides et plus faibles que les muscles typiques (Handsfield et al. 2022).
- Les muscles striés squelettiques observés par ultrasonographie chez des enfants avec PC présentent une architecture désorganisée en comparaison aux mêmes muscles chez des enfants du même âge au développement typique (Sikdar et al. 2018; Ogrodnik et Piszczatowski 2017) et une modification de l'angle de pennation des fibres musculaires (Kruse et al. 2018).
- La longueur du complexe muscle-tendon est significativement plus petite concernant les triceps suraux d'enfants avec PC spastique en comparaison à leurs pairs au développement typique. On observe également une augmentation de la proportion de la longueur du tendon d'Achille dans le complexe muscle-tendon chez les enfants avec PC en comparaison à leurs pairs sans TND (Kruse et al. 2018).

##### ✓ Croissance et rétractions musculaires

Les formes spastiques de PC se caractérisent par des déséquilibres de l'activité musculaire entre les muscles agonistes (spastiques) et antagonistes (faibles). Exacerbés par la croissance musculo-squelettique, ces déséquilibres musculaires évoluent le plus souvent vers des contractures musculaires, puis des pertes d'amplitudes articulaires et des vices architecturaux osseux (Degelaen et al. 2013; H. K. Graham et al. 2016; Mathewson et Lieber 2015; Lieber et Fridén 2019; Willerslev-Olsen et al. 2018; Catherine Tardieu et al. 1989). Bien que les rétractions des muscles squelettiques soient fréquentes chez les enfants présentant une PC spastique, les mécanismes sous-jacents restent peu clairs (Kruse et al. 2018; D.-Y. Lee 2019). Il semble que la fonction et la croissance normales des muscles dépendent de l'interaction de facteurs neuronaux, endocriniens, nutritionnels et mécaniques, ainsi que du développement d'un équilibre approprié entre la synthèse et la dégradation des protéines musculaires (Gough et Shortland 2012). Aussi, d'après la revue narrative de Handsfield et al, la croissance musculaire chez les personnes atteintes de PC est altérée par la spasticité. Aussi, la limitation de l'activité physique chez ces patients implique des anomalies métaboliques qui affectent la synthèse des protéines musculaires (Handsfield et al. 2022).

##### ✓ Faiblesse musculaire constitutive et secondaire

La faiblesse musculaire est un symptôme clinique courant chez les enfants présentant une PC spastique. En effet, les propriétés biomécaniques du complexe muscle-tendon dans cette population (augmentation de la raideur passive du muscle, architecture altérée, réduction de la longueur des fibres musculaires et augmentation du nombre de fibres musculaires courtes et épaisses) sont responsables d'une diminution de leur force intrinsèque (Kruse et al. 2017; Ogrodnik et Piszczatowski 2017; Barber, Barrett, et Lichtwark 2012). En conséquence, ces enfants deviennent physiquement moins actifs, et présentent un déconditionnement musculaire et cardio-respiratoire à l'effort. Un cercle vicieux s'installe avec la diminution de la charge mécanique appliquée au système musculo-squelettique qui s'associe à une fonte musculaire, affectant leur état de santé général (Kwon et Ahn 2016; Woollacott et Shumway-Cook 2005; Shelly et al. 2008).

#### 1.4.3.1.2 Limitations d'amplitudes articulaires et troubles architecturaux osseux

Les rétractions musculo-tendineuses associées à la croissance osseuse aboutissent à l'apparition progressive de limitations d'amplitudes articulaires (par exemple flexions de hanche et/ou de genou, équin de l'articulation talo-crurale...) et de vices architecturaux osseux (scoliose, excès d'antéversion fémorale, torsion tibiale interne...), tels que décrits dans la récente publication de Patel et al. (Patel et al. 2020; H. K. Graham et al. 2016) (Figure 1.4-2).

Affected area	Condition or deformity
Foot and ankle	Equinus, equinovarus, calcaneous deformity, valgus deformity of ankle
Lower extremities	Rotational deformities
Knee	Congenital knee flexion contractures, congenital knee hyperextension or dislocation, developmental knee flexion contracture, knee extension contractures, knee instability, internal derangements, crouch gait, knee dislocation, genu varum, genu valgum, genu recurvatum, patellar subluxation and dislocation, knee instability
Hips and pelvis	Abduction external rotation contracture, hip flexion deformity, hip subluxation and dislocation, wind-swept pelvis, pelvic obliquity
Spine	Kyphosis, scoliosis, hyperlordosis
Upper extremities	Shoulder contracture and instability, flexion contractures of wrist and fingers, thumb-in-palm deformity, elbow flexion contracture

Figure 1.4-2 : Limitations d’amplitudes articulaires et vices architecturaux osseux, associés à la PC de type spastique (Patel et al. 2020)

### 1.4.3.2 Modifications de l’alignement postural, de la forme et de la surface du polygone de sustentation

Les troubles musculo-squelettiques secondaires modifient l'alignement biomécanique dans les plans frontal et sagittal et contribuent aux déficits du contrôle postural. En effet, la position debout dans le plan sagittal au cours du développement typique est caractérisée par le passage du vecteur force de gravité en avant de l'articulation talo-crurale, au travers du genou, au travers ou légèrement en arrière de l'articulation coxo-fémorale. Cet alignement optimal est le plus économe en énergie et fournit une base pour la stabilité verticale (Leonard et al. 2021; Domagalska-Szopa et Szopa 2017).

Chez les enfants avec PC de type spastique, l’alignement biomécanique dans le plan sagittal peut être modifié par une cyphose dorsale, des flexions de hanches et/ou genoux (Fosdahl et al. 2020; Pantzar-Castilla, Wretenberg, et Riad 2021) (Figure 1.4-2 a), ou encore un équin fixé. Quant à lui, l’alignement biomécanique dans le plan frontal peut-être modifié par la présence d’une scoliose d’origine neurologique (Casey, Rosenblad, et Rodby-Bousquet 2022; Yen, Gartenberg, et Cho 2021; Hägglund et al. 2018; Domagalska-Szopa et Szopa 2013), d’une asymétrie de répartition du poids du corps, ou encore d’une inégalité de longueur des MI (Stanek et al. 2016; Lidbeck et al. 2014; Leonard et al. 2021) (Figure 1.4-2 b).

Enfin, le morphotype frontal des membres inférieurs (genu valgum ou genu varum), les limitations de longueurs musculaires de muscles extrinsèques du pied, et les déformations articulaires de la talo-crurale, de l’arrière-pied, du médio-pied et de l’avant pied, modifient la forme et la surface du polygone de sustentation, et la répartition des pressions plantaires (De Oliveira et al. 2021; Davids 2010; Kedem et Scher 2015; Galli 2015).

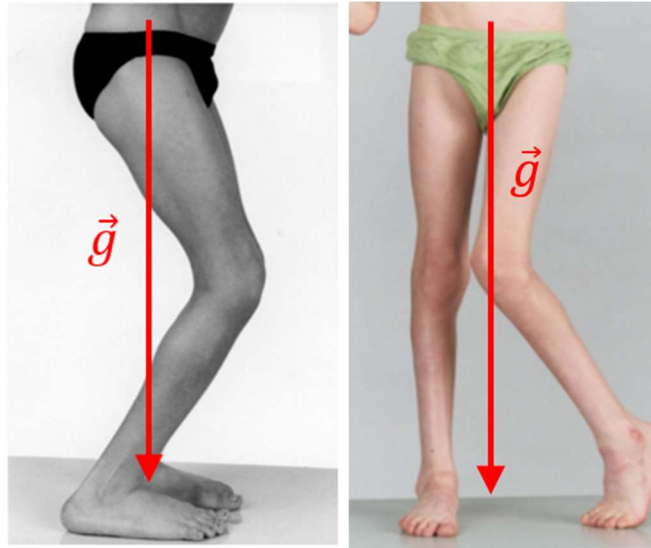


Figure 1.4-2 a : Enfant présentant une diparésie spastique, avec une attitude en flexion de hanches et genoux et flexion dorsale de la talo-crurale : le vecteur force de gravité passe en avant de l'articulation coxo-fémorale, en arrière du genou et en avant de l'articulation talo-crurale

Figure 1.4-2 b : Enfant présentant une hémiparésie spastique gauche, avec une symétrie conséquente des troubles musculo-squelettiques concentrés au MI gauche

## 1.5 Modalités d'évaluation de l'équilibre des enfants présentant une Paralysie Cérébrale

*« Tout le monde est un génie. Mais si vous jugez un poisson sur ses capacités à grimper à un arbre, il passera sa vie à croire qu'il est stupide. » (Albert Einstein)*

La fonction d'équilibration représente le socle de toute activité motrice humaine, des plus rudimentaires, comme être capable de tenir assis, aux plus complexes, comme la course ou les sauts. Les enfants avec PC de type spastique présentent des troubles du contrôle postural, d'origines multiples (déficits sensoriels, troubles du tonus, de la commande et de la force musculaires, problèmes musculo-squelettiques secondaires...). Cela impacte négativement leurs performances fonctionnelles dans des activités motrices liées à la vie quotidienne (difficultés à marcher, risque de chutes...), et entraîne une limitation de leur participation aux activités scolaires, de loisirs et sociales (Pavao 2014; Ozal, Aksoy, et Gunel 2022; Liao et Hwang 2003).

L'évaluation du contrôle postural chez les enfants présentant une PC est alors cruciale, non seulement pour quantifier leurs déficits d'équilibration, pour identifier et mesurer le risque de chute, mais aussi pour orienter et évaluer des prises de décisions thérapeutiques et rééducatives (Baker, Gough, et Gordon 2020). L'évaluation la fonction d'équilibration est un processus complexe qui implique l'examen de multiples systèmes et de leurs interactions réciproques. Il existe différentes modalités d'évaluation de la fonction d'équilibration, instrumentées ou cliniques, impliquant des méthodes qualitatives et quantitatives. En général, l'équilibre des enfants PC est évalué via des outils standardisés d'évaluation du développement moteur tels que le GMFM ou des plateformes d'évaluation posturales (Yi et al. 2012). Enfin, l'évaluation du contrôle postural lors des tâches fonctionnelles est primordiale afin de comprendre leurs difficultés d'équilibration en situations réelles de vie quotidienne (Pavão, Santos, Woollacott et Rocha, 2013).

### 1.5.1 Evaluation instrumentée de la fonction d'équilibration d'enfants présentant une Paralysie Cérébrale

Il existe différents moyens d'évaluation instrumentée de la fonction d'équilibration qui s'appliquent spécifiquement aux différentes étapes du processus de contrôle postural (Figure 1.5-1). D'une part, l'électromyographie (EMG) permet de mesurer l'activité électrique des muscles posturaux, aussi bien dans l'évaluation des activités réflexes, que dans les stratégies posturales d'équilibration issues des synergies musculaires. D'autre part, la cinématique permet d'étudier les amplitudes articulaires et les positions relatives des segments corporels qui s'assemblent en coordinations articulaires au cours des activités posturales. Enfin la posturographie, évalue la distribution du poids corporel sous chaque pied et les mouvements du CdP au cours de la station debout pendant différentes tâches posturales, grâce notamment à une ou plusieurs plateforme(s) de force ou encore un tapis composé de capteurs de pression matricielle,.

Ainsi, l'étude de la position du CdP est une variable globale et résultante qui, en quelque sorte, « résume » la posture et représente l'efficacité du système d'équilibration. Cependant, une même position du CdP peut être la résultante différentes coordinations segmentaires (Noé et Paillard 2016). Les conditions d'évaluations posturographiques peuvent être modifiées (Figure 1.5-1). Les manipulations sensorielles permettent d'étudier les phénomènes de pondérations et compensations sensorielles en conditions physiologiques ou pathologiques. Aussi, la mise en place de perturbations internes (mouvements volontaires effectués par le patient au cours de l'examen posturographique) ou externes (plateforme

de perturbation posturale) peuvent permettre de se rapprocher expérimentalement de conditions d'équilibration en vie réelle.

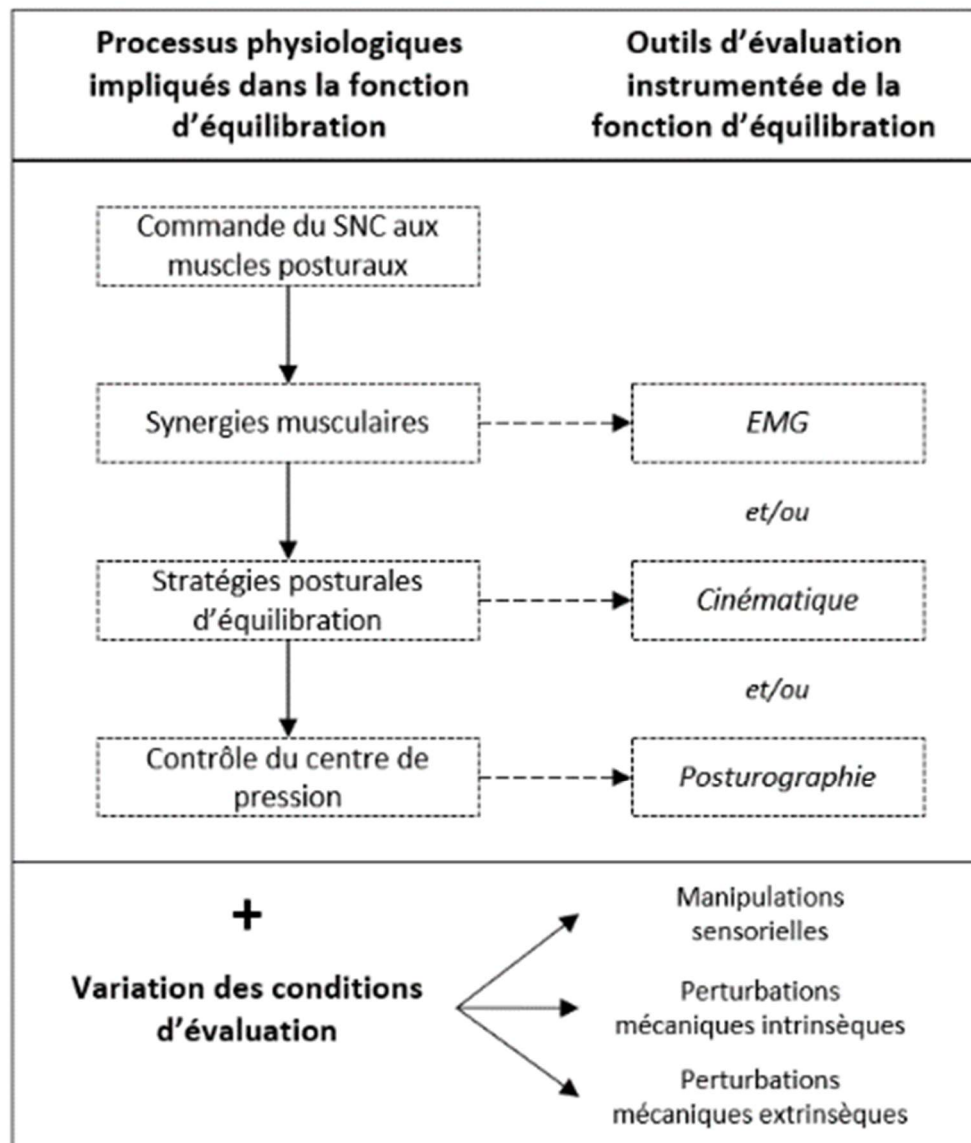


Figure 1.5-1 : Schématisation des différentes modalités d'évaluation instrumentée de la fonction d'équilibration

Dans le cadre de l'évaluation du contrôle postural chez des patients présentant une PC, ces différentes modalités d'évaluation instrumentée de la fonction d'équilibration sont volontiers associées. Pour exemples, González et al. évaluent les paramètres posturographiques associés à l'enregistrement EMG des muscles des MI en position statique (González et al. 2020), alors que Tomita et al. utilisent les mêmes outils d'évaluation au cours de tâches de préhension (Tomita et al. 2022). Pavão et al. évaluent quant à eux les paramètres posturographiques au cours de tâches fonctionnelles de type « assis-debout » (Silvia Leticia Pavão, Dos Santos, et al. 2014).

La posturographie dite « statique », c'est-à-dire sans perturbations internes ou externes associées, évalue l'équilibre debout soumis à la pesanteur et aux mouvements biologiques internes. C'est l'évaluation instrumentée la plus couramment utilisée pour la caractérisation de la fonction d'équilibration des enfants avec PC (González et al. 2020; Kingma et al. 2011; Lopes et David 2013; Özal, Aksoy, et Kerem Günel 2022; Sílvia Leticia Pavão et al. 2013). En effet, les plateformes de force et autres instruments d'évaluation posturographique, apportent des informations chiffrées précises sur la position du CdP au cours du temps et, de par l'utilisation de protocoles standardisés, présentent de très bonnes caractéristiques psychométriques (Barozzi et al. 2014; Visser et al. 2008; Schwesig, Becker, et Fischer 2014). Cependant, la posturographie en position statique debout au laboratoire sans perturbation interne ou externe, est peu écologique et ne représente pas la réalité des situations de vie réelle.

La posturographie dynamique informatisée (*Computerized Dynamic Posturography*) permet de répondre en partie à ce problème en appliquant des perturbations posturales externes au patient évalué. Ce type d'évaluation implique l'utilisation d'une plate-forme servo-commandée, matériel coûteux que l'on retrouve le plus souvent au sein d'un laboratoire d'analyse du mouvement. Les perturbations appliquées au patient peuvent être précisément quantifiées, et adaptées aux besoins des protocoles de recherche ou aux capacités des patients. Bien qu'il soit de plus en plus communément admis que les capacités d'équilibration dynamiques, au même titre que les capacités de déambulation, tiennent une place considérable dans l'autonomie fonctionnelle des patients avec troubles neurologiques centraux, la littérature fait état de peu d'études évaluant les capacités d'équilibration dynamique des enfants, adolescents et adultes avec PC. Enfin, couplée à des enregistrements cinématiques et EMG, la posturographie dynamique permet l'étude des stratégies posturales et synergies musculaires employées en situation instable.

Le NeuroCom Sensory Organisation Test(SOT) est le système de posturographie dynamique informatisée de référence. Il est utilisé pour quantifier et différencier objectivement les déficiences adaptatives sensorielles, motrices et centrales de la stabilité posturale. Il fournit une analyse qualitative et quantitative de la performance du contrôle de l'équilibre à travers la description du balancement du CdG en position debout (L. M. Nashner et Peters 1990). Au sein du système EquiTest R©, le test d'organisation sensorielle (SOT) crée des conditions de conflit sensoriel, rendant les systèmes de contrôle de l'équilibre visuel et/ou proprioceptif peu fiables. Des notes sont attribuées à l'oscillation du sujet (plus les notes sont élevées, plus la stabilité est grande). Sur la base des scores SOT dans les différentes conditions, des scores « d'analyse sensorielle » sont fournis. Des scores de référence établis chez des enfants au développement typique de 2 à 18 ans sont disponibles dans la littérature (Pletcher et al. 2017; Perucca et al. 2021; Shams et al. 2020). Cependant, peu d'études ont utilisé cet instrument chez les enfants avec PC (Ozal, Aksoy, et Gunel 2022; Stribling et Christy 2017).

Enfin, les capacités d'équilibrations dynamiques peuvent être évaluées au travers de mouvements intensionnels fonctionnels, effectués sur un dispositif de posturographie. Ce type de protocole, le plus souvent couplé avec des enregistrements EMG, permettent en particulier d'étudier les Ajustements Posturaux Anticipateurs (APA), préalables aux mouvements volontaires. On peut citer des études évaluant les paramètres posturographiques avant et pendant des tâches d'élévation des MS/préhension (Näslund, Sundelin, et Hirschfeld 2007; Bigongiari et al. 2011; Girolami, Shiratori, et Aruin 2011), ou encore au cours de mouvements globaux tels que des « assis-debout » (Sílvia Leticia Pavão, Dos Santos, et al. 2014; Sílvia L. Pavão et al. 2015; Sílvia Leticia Pavão, de Campos, et Rocha 2019).



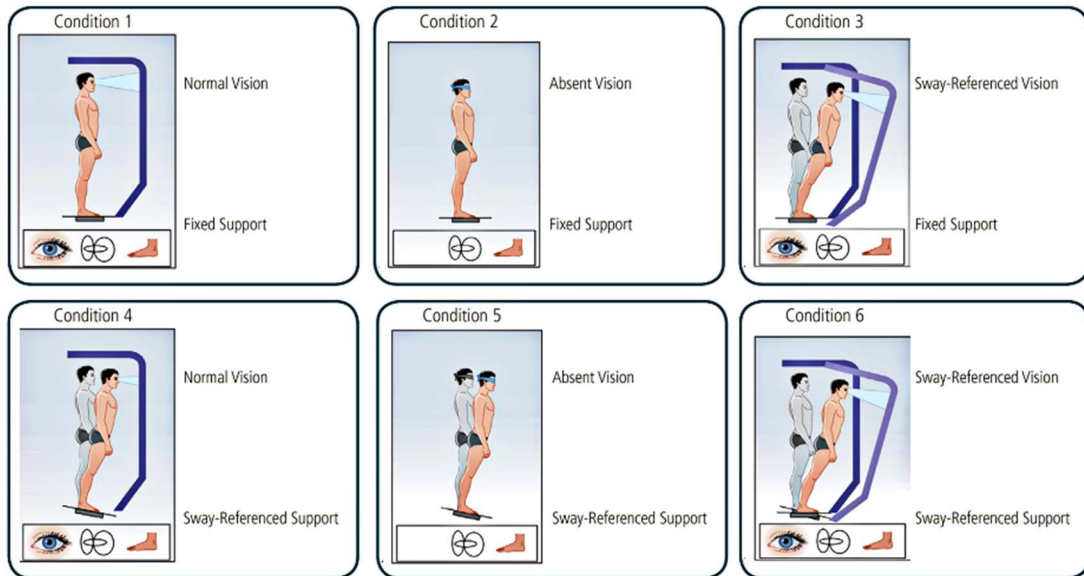


Figure 1.5-2 : Représentation schématique des 6 conditions d'évaluation posturographique du NeuroCom Sensory Organization Test (Shams et al. 2020)

## 1.5.2 Echelles cliniques d'évaluation de la fonction d'équilibration d'enfants présentant une Paralysie cérébrale de type spastique

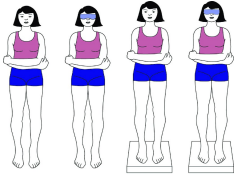

Bien que les méthodes d'évaluation instrumentées de la fonction d'équilibration soient hautement fiables et reproductibles, elles sont également coûteuses et ne sont pas facilement accessibles dans la pratique clinique quotidienne. Pour cette raison, les échelles cliniques d'évaluation de l'équilibre sont fréquemment choisies par les professionnels de rééducation, en raison de leur simplicité d'utilisation, du peu de matériel requis et du faible coût engagé.

Un mauvais contrôle postural entraîne des difficultés d'équilibration aussi bien au cours d'activités statiques que dynamiques, et impacte la fonction motrice globale, la déambulation et les AVQ des enfants présentant une PC. C'est pourquoi les échelles cliniques utilisées dans l'évaluation des capacités d'équilibration des enfants avec PC sont nombreuses et diversifiées. Cependant, la littérature scientifique fait état de qualités psychométriques de niveaux modérés ou limités pour la plupart de ces outils d'évaluation. Quatre échelles semblent sortir du lot grâce à leurs validité, fiabilité et sensibilité : la Trunk Control Measurement Scale, la Pediatric Balance Scale, le Timed Up and Go test et le Pediatric Reach Test (Sæther, Helbostad, Riphagen, et al. 2013; Verbecque et al. 2015; Sibley et al. 2017).

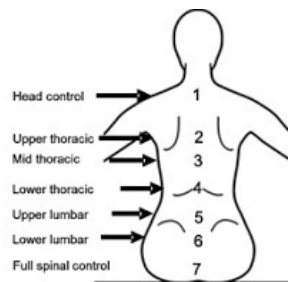
La Pediatric Balance Scale est la plus utilisée dans la littérature internationale pour l'évaluation de la fonction d'équilibration des enfants avec PC. Pavão et al. ont mis en évidence sa corrélation avec le GMFCS (Pavão 2014). D'après Panibatla et al., le score de PBS est corrélé à celui de la *Trunk Control Measurement Scale* (Panibatla, Kumar, et Narayan 2017). Selon Duarte et al, le score de PBS est également corrélée aux sections « mobility » et « self-care » de la *Pediatric Evaluation Disability Inventory* (Duarte 2014).


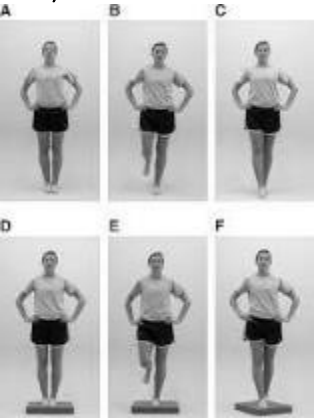
Le Tableau suivant établit une liste non exhaustive des échelles cliniques d'évaluation de la fonction d'équilibration chez les enfants avec PC les plus souvent retrouvées dans la littérature scientifique internationale. Elles sont classées en 8 grandes catégories (Tableau 1.5-1) :

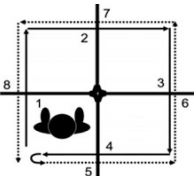

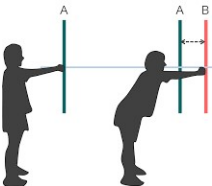
- Afférences sensorielles
- Equilibre en position assise et contrôle du tronc
- Evaluation analytique de l'équilibre statique
- Evaluation analytique de l'équilibre dynamique
- Evaluation fonctionnelle de la fonction d'équilibration
- Evaluation de la fonction motrice globale
- Evaluation de la stabilité à la marche
- Questionnaires parentaux d'évaluation de l'autonomie et de la participation sociale

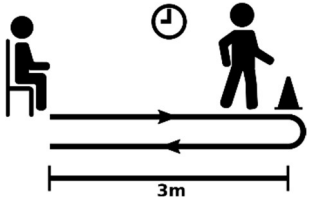
Echelle clinique	Description	Age cible	Références bibliographiques
<b>Afférences sensorielles</b>			
<b>Pediatric Clinical Test of Sensory Interaction on Balance (P-CTSIB)</b> 	<p>Echelle clinique dérivée de la version utilisée chez l'adulte : Clinical Test of Sensory Interaction on Balance (CTSIB).</p> <p>Evaluation des capacités d'équilibration debout suivant 4 modalités d'évaluations sensorielles :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- yeux ouverts, surface ferme</li> <li>- yeux fermés, surface ferme</li> <li>- yeux ouverts, surface mousse</li> <li>- yeux fermés, surface mousse</li> </ul> <p>Pour chaque condition, on évalue la durée de maintien de la position debout.</p>	2 à 18 ans	<p><i>Version initiale 1986 – 6 modalités d'évaluations (A. Shumway-Cook et Horak 1986)</i></p> <p><i>Version modifiée 1993 – 4 modalités d'évaluations (Cohen, Blatchly, et Gombash 1993; Abdel Ghafar et al. 2022; R. M. Dewar et al. 2022)</i></p> <p><i>Valeurs de référence (Deitz et al. 1991)</i></p>
<b>Romberg Test</b>  <b>Sharpened Romberg Test (Tandem Romberg Test)</b>   <b>Modified Romberg Test</b>	<p>Test de Romberg : évaluation des capacités d'équilibration statique debout pendant 30 secondes, pieds joints, membres supérieurs tendus en avant paumes tournées vers le sol). L'épreuve est effectuée yeux ouverts puis yeux fermés afin de déterminer la participation de la vision dans le maintien postural debout.</p> <p>Sharpened Romberg Test : protocole d'évaluation identique, mais les pieds sont placés en position "tandem", pied dominant en arrière.</p> <p>Modified Romberg Test : protocole d'évaluation identique, mais les pieds sont placés sur un tapis de mousse.</p>	<p>Non validé en dessous de 18 ans mais utilisation courante en pédiatrie</p>	<p><i>Valeurs de référence (Black et al. 1982; Thyssen et al. 1982; Richard W. Bohannon et al. 1984)</i></p> <p><i>Utilisations en pédiatrie (H.-K. Jung, Chung, et Lee 2017; Patel et LaBella 2022)</i></p>
<b>Profils sensoriels de Dunn</b>	<p>Pour chacun des cinq sens, le questionnaire évalue quantitativement et qualitativement la capacité de perception et de traitement de l'information sensorielle par l'enfant.</p> <p>Le profil sensoriel est établi à partir d'un questionnaire de 125 questions décrivant ses comportements face à diverses expériences sensorielles de la vie quotidienne.</p>	3 à 10 ans	<p><i>(Dunn 1994; Ermer et Dunn 1998; Dunn et Daniels 2002)</i></p> <p><i>Valeurs de référence enfants au développement typique (Dunn 1994; Dunn et Westman 1997; Little et al. 2017)</i></p>
<b>Equilibre en position assise – Contrôle du tronc</b>			

Echelle clinique	Description	Age cible	Références bibliographiques
<b>Trunk Impairment Scale (TIS)</b>	Evaluation des capacités d'équilibration statiques (3 items), dynamiques (10 items) et de coordinations (4 items) en position assise.	5 à 19 ans	<i>Validité chez les enfants avec PC (Saether, Helbostad, Adde, et al. 2013; Sílvia Leticia Pavão et al. 2019; Dasoju et al. 2021; H. Jung et Choi 2022)</i>
<b>Trunk Control Measurement Scale (TCMS) for children</b>	Evaluation des capacités d'équilibration statiques, dynamiques et réactions d'équilibrations posturales (15 items au total) en position assise.	5 à 19 ans	<i>Validité chez les enfants avec troubles neuro-moteurs (Ravizzotti et al. 2021)</i>  <i>Validité chez les enfants avec PC (Heyrman et al. 2011; Pham et al. 2016)</i>
<b>Segmental Assessment of Trunk Control (SATCo)</b>	<p>Echelle d'évaluation des capacités de contrôle du tronc de façon systématique, en position assise neutre à six niveaux segmentaires discrets tête/tronc et en position assise libre.</p> <p>Pour chaque niveau segmentaire testé, de façon caudo-céphalique, l'échelle évalue le contrôle moteur (pas de contrôle, contrôle statique, actif ou réactif).</p>	Nourrissons à partir de 8 mois, enfants et adolescents	<i>Validité chez les nourrissons à risque de développer un Trouble du Neuro-Développement (Pin et al. 2020; Sangkarit et al. 2021)</i>  <i>Validité chez les enfants avec PC (Bañas et Gorgon 2014; Rodby-Bousquet, Persson-Bunke, et Czuba 2015; L. Hansen et al. 2018; Sánchez et al. 2018; Tedla et Reddy 2021)</i>
<b>Evaluation analytique de l'équilibre statique</b>			
<b>Equilibre bipodal</b>	Evaluation chronométrée du temps passé en équilibre debout bipodal.	Dès l'acquisition de la station debout	<i>Validité et valeurs de référence pour enfants au développement typique (C. Hansen et al. 2016; Condon et Cremin 2014)</i>
<b>Tandem Stance Test (TST)</b>	Evaluation chronométrée du temps passé en équilibre debout bipodal, pieds en tandem.	Dès l'acquisition de la station debout	<i>Validité et valeurs de référence pour enfants au développement typique (C. Hansen et al. 2016; Condon et Cremin 2014; Dhanani et Parmar 2014)</i> <i>Validité chez les enfants avec PC (Liao, Mao, et Hwang 2001)</i>



Echelle clinique	Description	Age cible	Références bibliographiques
<p><b>Single Leg Stance Test (SLST) = One Leg Standing Test (OLST)</b></p> 	<p>Evaluation chronométrée du temps passé en équilibre debout unipodal.</p>	<p>Dès l'acquisition de la station debout unipodale</p>	<p><i>Validité et valeurs de référence pour enfants au développement typique (C. Hansen et al. 2016; Condon et Cremin 2014; Verbecque et al. 2015; Mani et al. 2019; Zumbrunn, MacWilliams, et Johnson 2011)</i></p> <p><i>Validité chez les enfants avec PC (Liao, Mao, et Hwang 2001; Ertürk et al. 2021; Gan et al. 2008)</i></p>
<p><b>Balance Error Scoring System (BESS)</b></p> 	<p>Le BESS (Balance Error Scoring System) est un test rapide et facile pour mesurer l'équilibre statique. Il se compose de trois positions sur deux surfaces différentes, et le patient doit rester en équilibre pendant 20 secondes dans chaque position. Le nombre d'erreurs est compté, et un score total est calculé à partir de la somme des erreurs dans chaque position. Les erreurs comprennent le déplacement des mains, l'ouverture des yeux, le trébuchement, l'abduction de la hanche, le soulèvement de l'avant-pied ou du talon de la surface de test, ou le fait de rester hors de la position appropriée pendant plus de 5 secondes.</p>	<p>5-18 ans</p>	<p><i>Validité et valeurs de référence pour enfants au développement typique (Kuo et al. 2021; Sheehan, Lafave, et Katz 2011; C. Hansen et al. 2017; 2016)</i></p> <p><i>Utilisation chez les enfants avec PC (Tuncer et al. 2022; Elshafey, Abdrabo, et Elnaggar 2022)</i></p>

Echelle clinique	Description	Age cible	Références bibliographiques
<b>Evaluation analytique de l'équilibre dynamique</b>			
<b>Four Square Step Test (FSST)</b> 	<p>Le Four Square Step Test est utilisé pour évaluer la stabilité dynamique et la coordination. Il examine la capacité du sujet à enjamber des objets bas vers l'avant, sur le côté et vers l'arrière. Consigne : enjamber séquentiellement quatre cannes disposées en croix sur le sol.</p>	6-18 ans	<p><i>Validité et valeurs de référence pour enfants au développement typique (Leizerowitz et Katz-Leurer 2017; Salis et Samuel 2014)</i></p> <p><i>Validité chez les enfants avec PC (Bandong, Madriaga, et Gorgon 2015; Gorgon et al. 2014)</i></p>
<b>Star Excursion Balance Test (SEBT)</b> 	<p>Le Star Excursion Balance Test consiste en une série de tâches d'extension du membre inférieur dans huit directions. Il est couramment utilisé en pratique clinique pour mesurer la performance posturale dynamique des MI.</p>	6-18 ans	<p><i>Validité et valeurs de référence pour enfants au développement typique (Shaikh et Walunjkar 2014; Calatayud et al. 2014)</i></p> <p><i>Validité chez les enfants avec PC (D.-H. Kim, An, et Yoo 2020)</i></p>
<b>Pediatric Reach Test (PRT) - version modifiée du Functional Reach Test (FRT)</b> 	<p>Le Functional Reach Test, permet d'évaluer la limite de stabilité antérieure. Il consiste à mesurer la différence, en centimètres, entre la longueur des MS tendus en avant (90° de flexion antérieure d'épaule) et la portée maximale vers l'avant atteinte par le patient, sans qu'il ne bouge ses pieds.</p> <p>Le FRT a été modifié en Pediatric Reach Test (PRT), pour incorporer les limites de stabilité latérales (allongement latéral), en plus des limites de stabilité antérieure, en position assise et debout.</p>	3-18 ans	<p><i>Validité et valeurs de référence pour enfants au développement typique (Norris, Wilder, et Norton 2008; Volkman et al. 2007; Donahoe, Turner, et Worrell 1994; Deshmukh, Ganesan, et Tedla 2011)</i></p> <p><i>Validité chez les enfants avec PC (D. Bartlett et Birmingham 2003; Niznik, Turner, et Worrell 1996)</i></p>

Echelle clinique	Description	Age cible	Références bibliographiques
<p data-bbox="159 236 421 260"><b>Timed Up and Go (TUG)</b></p> 	<p data-bbox="517 236 1272 486">Le test Timed Up and Go test un test clinique simple et rapide utilisé pour évaluer la mobilité et la stabilité de patients de tous âges. chez les personnes âgées présentant une déficience physique. Le patient est invité à se lever d'une chaise, à marcher sur une distance de 3 mètres, à tourner autour d'un cône, puis à retourner s'asseoir sur la chaise. Le temps nécessaire pour effectuer la tâche est enregistré et peut être utilisé pour évaluer la performance du patient ou l'efficacité d'un traitement.</p>	<p data-bbox="1361 236 1458 260">3-18 ans</p>	<p data-bbox="1503 236 1973 327"><i>Validité et valeurs de référence pour enfants au développement typique (Williams et al. 2005; Nicolini-Panisson et Donadio 2013)</i></p> <p data-bbox="1503 368 2004 486"><i>Validité chez les enfants avec PC (Saether, Helbostad, Riphagen, et al. 2013; Verbecque et al. 2019; Carey et al. 2016; Dhote, Khatri, et Ganvir 2012)</i></p>
<b>Evaluation fonctionnelle de la fonction d'équilibration</b>			
<p data-bbox="159 603 472 627"><b>Pediatric Balance Scale (PBS)</b></p>	<p data-bbox="517 603 1272 786">La Pediatric Balance Scale (version pédiatrique de la Berg Balance Scale) est un outil d'évaluation fonctionnelle de l'équilibre, conçu pour les enfants âgés de 2 à 18 ans. Il comporte 14 items qui évaluent différents aspects de l'équilibre, tels que la stabilité statique et dynamique, la capacité à se pencher en avant, ou encore la coordination des mouvements.</p>	<p data-bbox="1361 603 1458 627">2-18 ans</p>	<p data-bbox="1503 603 1995 722"><i>Validité et valeurs de référence pour enfants au développement typique (Franjoine, Gunther, et Taylor 2003; Franjoine et al. 2010; 2022; Darr et al. 2015)</i></p> <p data-bbox="1503 764 1995 853"><i>Validité chez les enfants avec PC (C. Chen 2013; Duarte 2014; Jantakat et al. 2014; Kwon et Ahn 2016)</i></p>
<p data-bbox="159 861 450 917"><b>Kids-Balance Evaluation System Test (Kids-BESTest)</b></p> <p data-bbox="159 959 472 1050"><b>Kids-Mini-Balance Evaluation System Test (Kids-Mini-BESTest)</b></p>	<p data-bbox="517 861 1272 1050">Le Kids-BESTest évalue 6 composantes du contrôle de l'équilibre, à travers 36 tâches (27 items) réparties en six domaines: Contraintes biomécaniques, Limites de stabilité/verticalité, Réponses posturales réactives, Ajustements posturaux anticipés, Orientation sensorielle et Stabilité de la marche. Le Kids-Mini-BESTest, version abrégée du Kids-BESTest, contient 17 tâches (14 items).</p>	<p data-bbox="1361 861 1458 885">7-18 ans</p>	<p data-bbox="1503 861 1973 952"><i>Validité et valeurs de référence pour enfants au développement typique (R. Dewar et al. 2019; Johnson et al. 2023)</i></p> <p data-bbox="1503 994 1995 1050"><i>Validité chez les enfants avec PC (R. Dewar et al. 2019; R. M. Dewar et al. 2022)</i></p>
<p data-bbox="159 1125 495 1181"><b>Early Clinical Assessment of Balance (ECAB)</b></p>	<p data-bbox="517 1125 1272 1345">L'ECAB est une valuation clinique précoce de l'équilibre de nourrissons et d'enfants dès l'âge de 18 mois. Le test prend généralement 15 à 30 minutes et ne nécessite aucun matériel en dehors d'un banc et d'un tapis. La notation est sur une échelle de 0 à 100 où des scores plus élevés correspondent à un meilleur équilibre. L'ECAB peut identifier les enfants à haut risque de chute et mesurer des modifications de capacités d'équilibrations.</p>	<p data-bbox="1361 1125 1458 1149">18 mois-5 ans</p>	<p data-bbox="1503 1141 1995 1232"><i>Validité chez les enfants avec PC (McCoy et al. 2014; Pierce et al. 2019; 2020; LaForme Fiss et al. 2019)</i></p>

Echelle clinique	Description	Age cible	Références bibliographiques
<b>Community Balance and Mobility Scale (CBMS)</b>	La Community Balance and Mobility Scale a été développée pour évaluer l'équilibre de patients à haut niveau fonctionnel, mais dont les troubles affectent la participation sociale. Bénéfique pour les patients qui ont atteint un effet plafond sur La PBS ou le TUG.	7-18 ans	<i>Validité et valeurs de référence pour enfants au développement typique (F. V. Wright, Ryan, et Brewer 2010; M. J. Wright et Bos 2012)</i>  <i>Validité chez les enfants avec PC (Brien et Sveistrup 2011)</i>
<b>Fullerton Advanced Balance (FAB) Scale</b>	La Fullerton Advanced Balance Scale (FAB) est une échelle d'évaluation de l'équilibre, désignée pour évaluer les patients avec un bon niveau fonctionnel. 10 items, correspondant à des tâches fonctionnelles en équilibre statique et dynamique. Passation en 10 à 15 minutes.	Enfants et adolescents	<i>Validité et valeurs de référence pour enfants au développement typique (Johnson et al. 2023)</i>  <i>Validité chez les enfants avec PC (Jeon et Kim 2016; G. Kim 2016; 2018)</i>
<b>Evaluation de la fonction motrice globale</b>			
<b>Evaluation Motrice Fonctionnelle Globale : EMFG 88 ou 66</b>  <b>(en anglais: Gross Motor Function Measure, GMFM 88-GMFM 66)</b>	L'Évaluation Motrice Fonctionnelle Globale (EMFG) est un outil d'évaluation standardisé utilisé pour évaluer la fonction motrice globale chez de nourrisson, enfants et adolescents en situation de handicap neuro-moteur (Paralysie Cérébrale, Traumatisme crânien...). L'EMFG existe en deux versions : l'EMFG 66 et l'EMFG 88. Les deux versions de l'EMFG fournissent des scores pour chaque domaine évalué, ainsi qu'un score global qui reflète la fonction motrice globale de l'enfant. Les items sont regroupés en 5 rubriques : A - Position allongée et retournement, B - Station assise, C - Quatre pattes et à genoux dressés, D - Station debout, E - Marche course et saut.	6 mois à 18 ans	<i>Manuel de passation (Russell et al. 2002)</i>  <i>Validité chez les enfants avec PC (Avery, Russell, et Rosenbaum 2013; Wei et al. 2006; Lundkvist Josenby et al. 2009; Alotaibi et al. 2014)</i>
<b>Functional Mobility Scale (FMS)</b>	La Functional Mobility Scale mesure la mobilité quotidienne des enfants atteints de paralysie cérébrale (PC) pour trois distances représentatives du domicile (5 m), de l'école (50 m) et de la communauté (500 m). Pour chaque distance, une cotation de 1 à 6 est attribuée en fonction de l'aide requise, allant de la chaise roulante (1) à l'indépendance sans dispositif sur toutes les surfaces (6). Elle est administrée par le clinicien en posant quelques questions à l'enfant et/ou aux parents pour obtenir une cotation de la "performance" de la mobilité de l'enfant.	2 à 18 ans	<i>Validité chez les enfants avec PC (H. K. Graham et al. 2004; Harvey et al. 2010; Wilson, Mackey, et Stott 2014)</i>



Echelle clinique	Description	Age cible	Références bibliographiques
<b>Revised High Level Mobility Assessment Tool (HiMAT)</b>	Echelle d'évaluation de la fonction motrice globale, chez des enfants avec de bonnes capacités neuro-motrices : course, sauts, escaliers...	5 à 12 ans	<i>Validité et valeurs de référence pour enfants au développement typique (Eldridge et al. 2020; Hill, Eldridge, et Williams 2022)</i>
<b>Evaluation de la stabilité à la marche</b>			
<b>Pediatric Modified Dynamic Gait Index (DGI)</b>	Le Dynamic Gait Index (DGI) est un outil développé pour évaluer la capacité du patient adulte à adapter sa marche à des tâches de marche complexes couramment rencontrées dans les déplacements quotidiens. Il comprend huit éléments traitant de plusieurs problèmes d'équilibre qui obligent un individu à utiliser des repères visuels, somatosensoriels et vestibulaires pour maintenir une démarche dynamique et fonctionnelle (Shumway-Cook et Woollacott, 1995). La version modifiée pour les enfants apporte de légères modifications dans l'administration, notamment en fournissant une démonstration de nombreux items, en simplifiant les instructions verbales et en permettant à un enfant de répéter l'item 8 (monter les escaliers) sans utiliser la main courante avant de marquer.	Enfants et adolescents	<i>Validité chez les enfants avec PC</i>
<b>Questionnaires parentaux d'évaluation de l'autonomie et de la participation sociale</b>			
<b>Pediatric Evaluation of Disability Inventory (PEDI)</b>	L'échelle Pediatric Evaluation of Disability Inventory (PEDI) est un outil d'évaluation standardisé qui permet d'évaluer les capacités d'un enfant à réaliser des AVQ, comme s'habiller, se nourrir, se déplacer, communiquer et jouer. La PEDI est composée de trois domaines d'évaluation : la capacité fonctionnelle, la performance fonctionnelle et la participation. La capacité fonctionnelle mesure le potentiel d'un enfant à accomplir une activité en fonction de son développement physique et mental. La performance fonctionnelle mesure la façon dont l'enfant effectue réellement une activité dans des conditions normales. La participation mesure l'implication de l'enfant dans les AVQ et son niveau d'indépendance. La PEDI est un outil largement utilisé par les professionnels de la santé pour évaluer les enfants atteints de handicaps physiques, mentaux ou développementaux.	6 mois à 7ans	<i>Validité et valeurs de référence pour enfants au développement typique (Feldman, Haley, et Coryell 1990; M. Berg et al. 2004; Haley et al. 2010)</i>  <i>Validité chez les enfants avec PC (Vos-Vromans, Ketelaar, et Gorter 2005; Shore et al. 2019)</i>

Echelle clinique	Description	Age cible	Références bibliographiques
<b>Mesure de l'Indépendance Fonctionnelle – MIF-Mômes (Wee-FIM)</b>	La MIF-Mômes examine les compétences fonctionnelles et de la vie quotidienne de base chez les enfants de la naissance à 7 ans. Le WeeFIM est calqué sur la Mesure d'Indépendance Fonctionnelle (FIM) pour les adultes et comprend 18 items dans les sous-échelles suivantes : soins personnels, contrôle du sphincter, transferts, locomotion, communication et cognition sociale.	De 6 mois à 7 ans	Validité et valeurs de référence pour enfants au développement typique (M. E. Msall et al. 1994; Michael E. Msall et al. 1994)  Validité chez les enfants avec PC (Gunel 2009; Wong et al. 2004)
<b>Children's Assessment of Participation and Enjoyment (CAPE)</b>	La Children's Assessment of Participation and Enjoyment est une échelle d'évaluation utilisée pour mesurer la participation et le plaisir des enfants dans leurs activités quotidiennes. Elle est remplie par le parent ou le tuteur de l'enfant et fournit une mesure quantitative de la participation de l'enfant dans différents types d'activités. Evaluation de la participation par 44 items, répartis en 6 domaines : activités de la vie quotidienne, utilisation des objets de la vie quotidienne, jeux, loisirs, participation sociale, scolarité.	6 à 18 ans	Description et validité (Imms 2008; Ullenhag et al. 2012)  Validité chez les enfants avec PC (Majnemer et al. 2008; Imms et al. 2017)

Tableau 1.5-1: Synthèse des échelles cliniques d'évaluation de la fonction d'équilibration pour des enfants avec paralysie cérébrale

## 1.6 Résumé du cadre théorique

### Résumé du cadre théorique

- ✓ La PC décrit un groupe de troubles permanents du développement du mouvement et de la posture, entraînant des limitations d'activité, qui sont attribués à des perturbations non progressives apparaissant pendant le développement fœtal ou du cerveau du nourrisson.
- ✓ Les trois grands systèmes responsables du contrôle postural sont le système sensoriel, le système nerveux central et le système musculo-squelettique. Ils se développent et mûrissent jusqu'au début de l'âge adulte, à des rythmes différents et de manière non linéaire.
- ✓ La fonction d'équilibration représente le socle de toute activité motrice humaine, des plus rudimentaires, comme être capable de tenir assis, aux plus complexes, comme la course ou les sauts. Sur le plan physiologique, l'équilibre se caractérise par une boucle de rétroaction complexe, dirigée par le SNC.
- ✓ Dans le cadre de la PC de type spastique, les causes des troubles de la posture et de l'équilibre sont multiples (sensorielles, centrales et musculo-squelettiques), et souvent intriquées les unes avec les autres. Cela impacte négativement leurs performances fonctionnelles dans des activités motrices liées à la vie quotidienne (difficultés à marcher, risque de chutes...), et entraîne une limitation de leur participation aux activités scolaires, de loisirs et sociales.
- ✓ L'évaluation de la fonction d'équilibration est un processus complexe qui implique l'examen de multiples systèmes et de leurs interactions réciproques. Il existe différentes modalités d'évaluation de la fonction d'équilibration, instrumentées ou cliniques, impliquant des méthodes qualitatives et quantitatives. L'évaluation du contrôle postural lors des tâches fonctionnelles est primordiale afin de comprendre leurs difficultés d'équilibration en situations réelles de vie quotidienne.
- ✓ La Pediatric Balance Scale est l'échelle clinique la plus utilisée dans la littérature internationale pour l'évaluation de la fonction d'équilibration des enfants avec PC.
- ✓ La fonction d'équilibration posturale, comme toute autre activité motrice, requiert un apprentissage et peut être entraînée et rééduquée afin d'en améliorer son efficacité.

## 2 Problématique, hypothèses de recherche et méthodologie générale

*“Many systems need to be evaluated to understand what is wrong with a person’s balance.”  
(Horak, 2006)*

### 2.1 Problématique et hypothèses de recherche

L'étude des troubles de l'équilibre chez les enfants présentant une PC de type spastique se situe à l'intersection de trois grands domaines :

- ✓ la physiologie de la fonction d'équilibration, qui implique la collecte d'informations sensorielles, leur traitement par le SNC, et la production de réponses motrices permettant de maintenir les différents segments corporels en position stable,
- ✓ la maturation de la fonction d'équilibration chez les enfants, qui commence dès la période fœtale et se poursuit jusqu'au début de l'âge adulte. Celle-ci s'inscrit dans le cadre plus global du développement neuro-moteur,
- ✓ la paralysie cérébrale de type spastique qui génère des troubles de la posture et de l'équilibre de gravité variable, et dont les causes sont multiples et intriquées.

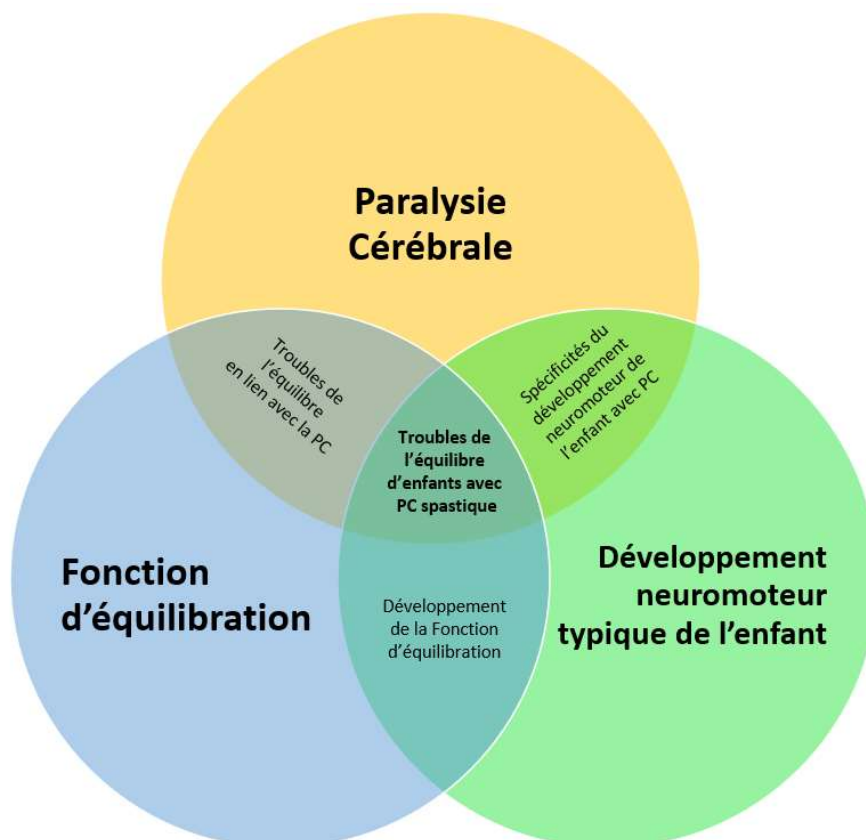


Figure 2.1-1 : Schématisation de l'intrication de la physiologie de la fonction d'équilibration, du développement neuromoteur typique de l'enfant et de la physio-pathologie de la PC, dans l'étude des troubles de l'équilibre chez les enfants avec PC

Les troubles de la fonction d'équilibration observés chez les enfants avec PC de type spastique, entraînent non seulement des difficultés posturales en conditions statique et/ou dynamique, mais aussi des troubles de la fonction motrice globale ou encore de la déambulation. Cela implique une diminution de leur participation aux AVQ, ainsi qu'aux activités scolaires et de loisirs. En effet, le contrôle postural et la fonction d'équilibration représentent la base sur laquelle nous appuyons toute notre motricité et jouent un rôle crucial dans notre autonomie fonctionnelle. L'évaluation de la fonction d'équilibration nécessite alors une analyse croisée des capacités posturales et de la motricité fonctionnelle globale.

Bien que souvent considérée comme non fonctionnelle, l'utilisation de la posturographie statique s'est peu à peu démocratisée à la fois en recherche et en pratique clinique courante. La posturographie dynamique se rapproche davantage des conditions de vie réelle, mais est peu souvent utilisée de par son coût et sa complexité de mise en œuvre. Cependant, ces outils d'évaluation posturographiques ne nous renseignent pas sur les capacités fonctionnelles d'équilibration de l'enfant lors de ses activités quotidiennes. Parmi les échelles cliniques fonctionnelles d'évaluation de la fonction d'équilibration disponibles en neurologie pédiatrique, la Pediatric Balance Scale s'est imposée en raison de ses bonnes qualités psychométriques et de sa simplicité d'utilisation. De plus, la littérature montre que la PBS est corrélée à la motricité globale, à l'autonomie dans les AVQ et à la participation sociale chez les enfants présentant une PC. Il paraît donc légitime de se demander quels sont les facteurs qui influencent les scores de PBS chez ces enfants. Cela ouvre éventuellement la possibilité de concevoir un projet de rééducation/réadaptation visant à améliorer ce score de PBS.

**La problématique principale de cette thèse peut donc être formulée comme suit : Quels sont les facteurs déterminants des capacités fonctionnelles d'équilibration chez les enfants âgés de 5 à 12 ans présentant une paralysie cérébrale de type spastique ? Le critère principal d'évaluation utilisé est le score à l'échelle Pediatric Balance Scale.**

Nous émettons les hypothèses suivantes : les caractéristiques cliniques (topographie de l'atteinte, GMFCS, spasticité aux membres inférieurs), les paramètres posturographiques en conditions quasi-statiques et dynamiques, et les traitements neuro-orthopédiques entrepris, déterminent les capacités fonctionnelles d'équilibration des enfants âgés de 5 à 12 ans présentant une PC de type spastique. Afin de tester ces hypothèses nous avons mené des évaluations de la fonction d'équilibration dans une population d'enfants âgés de 5 à 12 ans présentant une PC spastique, incluant :

- ✓ Une évaluation clinique analytique des amplitudes articulaires et de la spasticité musculaire aux membres inférieurs
- ✓ Une évaluation clinique fonctionnelles avec la passation de la Pediatric Balance Scale,
- ✓ Une évaluation posturographique en conditions quasi-statique puis dynamique, avec des perturbations induites par une plateforme robotisée de perturbation posturale.

## 2.2 Méthodologie générale

Ce manuscrit de thèse rassemble les résultats de trois études cliniques (Etudes 1 à 3) (Tableau 2.2-1). Les études 1 et 2 sont présentées sous forme de publications scientifiques. Les Etudes 1 et 2 sont issues d'un recueil de données transversal, tandis que l'étude 3 est issue d'un recueil de données longitudinal.

L'ensemble des données cliniques ont été collectées entre janvier 2018 et décembre 2019, au sein de l'Unité Fonctionnelle d'Analyse du Mouvement des Hôpitaux de Saint-Maurice (94, France), sous la responsabilité du Dr Michel Thétio, Médecin chef de l'UFAM et promoteur du protocole de recherche auprès du Comité de Protection des Personnes.

	Type d'étude	Titre de l'étude	Population étudiée
<p><b>Etude 1</b> Article soumis <i>European Journal of Paediatric Neurology</i></p>	Descriptive Transversale	La quantité de spasticité mesurée aux muscles des membres inférieurs d'enfants présentant une Paralysie Cérébrale est-elle un déterminant de leurs capacités fonctionnelles d'équilibration ?	PC spastique 5 à 12 ans  GMFCS I II III  n=42
<p><b>Etude 2</b> Article en cours de préparation pour soumission à une revue internationale à comité de relecture</p>	Descriptive Transversale	Les paramètres posturographiques, évalués en conditions quasi-statique et dynamique, sont-ils des déterminants des capacités fonctionnelles d'équilibration d'enfants présentant une Paralysie Cérébrale de type spastique ?	PC spastique 5 à 12 ans  GMFCS I II  n=35
<p><b>Etude 3</b></p>	Descriptive Longitudinale	Les traitements neuro-orthopédiques dispensés aux enfants présentant une Paralysie Cérébrale de type spastique sont-ils des déterminants de leurs capacités fonctionnelles d'équilibration ?	PC spastique 5 à 12 ans  GMFCS I II  n=8

Tableau 2.2-1 : Description méthodologique des Etudes 1 à 3

### 2.2.1 Considérations éthiques

Le protocole général de recherche, commun aux Etudes 1 à 3, a reçu :

- Une déclaration de conformité à une méthodologie de référence de la CNIL datée du 20 avril 2017 (Annexe)
- Un avis favorable du Comité de Protection des Personnes Ile-De-France V, Ref CPP 16188, N°ID-RCB 2016-A01776-45, daté du 16 mai 2017 (Annexe)
- Un avis favorable de l'ANSM, daté du 20 juillet 2017 (Annexe).

Toute évaluation de patient, en lien avec ce travail de recherche, est menée sous la responsabilité du promoteur auprès du Comité de Protection des Personnes et médecin chef de l'UFAM, Dr Thétio. D'autre part, un médecin de l'UFAM est systématiquement présent dans les locaux de l'UFAM lors des évaluations de l'équilibre.

## 2.2.2 Population d'étude

### 2.2.2.1 Modalités de recrutement

Les jeunes patients inclus dans cet ensemble d'études sont présents au sein de l'Unité Fonctionnelles d'Analyse du Mouvement (UFAM) des Hôpitaux de Saint-Maurice (94, France) dans le cadre de leurs rendez-vous médicaux d'évaluations et/ou d'appareillages en Hôpital de Jour. Les Médecins de Médecine Physique et Réadaptation du service orientent parmi leurs patients, ceux qui répondent aux critères d'inclusion dans le protocole.

### 2.2.2.2 Critères d'inclusion, de non-inclusion et d'exclusion

Sont inclus dans cet ensemble d'études des enfants de 5 à 12 ans révolus pour lesquels un diagnostic de Paralyse Cérébrale a été posé, à l'exclusion de toute autre pathologie neurologique congénitale dégénérative ou acquise. Le tableau neurologique peut être de type spastique pure ou mixte et la topographie de l'atteinte bilatérale (diparésie, quadriparésie) ou unilatérale (monoparésie, hémiparésie). Ils doivent être capables de se tenir debout sans appui des membres supérieurs pendant le temps de l'évaluation sur plateforme de perturbation posturale (GMF-CS I à III) (Tableau 2.2-2).

Ne sont pas inclus dans cette étude les enfants ayant un âge strictement inférieur à 5 ans ou strictement supérieur à 12 ans révolus, ceux n'ayant pas un diagnostic de Paralyse Cérébrale confirmé, ceux présentant une Paralyse Cérébrale de type dystonique ou dyskinétique, ceux ayant un GMF-CS IV ou V et ceux souffrant d'une épilepsie non contrôlée. Toute pathologie concomitante grave, non habituellement associée à la PC constitue également un critère de non-inclusion, ainsi que tout diagnostic de déficience visuelle et/ou auditive non appareillée(s) ou dysfonctionnement vestibulaire connu. Toute injection de toxine botulinique dans les MI datant de moins de 6 mois, toute neuro-chirurgie ou chirurgie orthopédique des MI datant de moins de 18 mois, constituent des critères de non-inclusion. Enfin, les enfants présentant des troubles cognitifs et/ou comportementaux compromettant la compréhension des instructions de passation de la *Pediatric Balance Scale* et des consignes d'évaluations posturographiques. Les critères d'exclusion de l'étude sont la non-signature du formulaire de consentement éclairé par le parent accompagnant, ainsi que toute évaluation non finalisée (Tableau 2.2-2).

<b>Critères d'inclusion</b> <i>Toutes ces conditions devant être réalisées pour inclure le patient au protocole (et = ∩)</i>	<b>Critères de non-inclusion</b> <i>L'une ces conditions suffisant à ne pas inclure le patient au protocole (ou = ∪)</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>∩ Enfants âgés de 5 à 12 ans révolus</li> <li>∩ Diagnostic de PC établi</li> <li>∩ Atteinte unilatérale (monoparésie, hémiparésie) ou bilatérale (diparésie, quadriparésie)</li> <li>∩ Formes spastiques (pures ou mixtes)</li> <li>∩ GMF-CS I à III</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>∪ Enfants âgés de moins de 5 ans ou de plus de 12 ans révolus</li> <li>∪ Pas de diagnostic de PC</li> <li>∪ Formes dystoniques ou dyskinétiques</li> <li>∪ GMF-CS IV ou V</li> <li>∪ Epilepsie non contrôlée</li> <li>∪ Pathologie concomitante grave non habituellement associée à la PC</li> <li>∪ Déficience visuelle et/ou auditive non appareillée(s) ou dysfonctionnement vestibulaire connu</li> <li>∪ Injection de Toxine Botulinique dans les MI datant de moins de 6 mois, ou neurochirurgie ou chirurgie orthopédique des MI datant de moins de 18 mois</li> <li>∪ troubles cognitifs ou comportementaux compromettant la compréhension des instructions de passation de la <i>Pediatric Balance Scale</i> et des consignes d'évaluations posturographiques</li> </ul>
<b>Critères d'exclusion</b> <i>L'une ces conditions suffisant à ne pas inclure le patient au protocole (ou = ∪)</i>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>∪ Non signature du formulaire de consentement éclairé par le parent accompagnant</li> <li>∪ Evaluation non finalisée</li> </ul>	

Tableau 2.2-2 : Critères d'inclusion, de non-inclusion et d'exclusion de patients au protocole expérimental

### 2.2.2.3 Modalités d'information et de recueil de consentement éclairé

Les modalités d'informations sur le protocole de recherche diffèrent en fonction de l'âge et des capacités cognitives des participants (Tableau 2.2-3). Pour les enfants de moins de 6 ans ou les enfants de 6 ans et plus ne sachant pas lire, l'information est donnée au à l'oral, avec un discours adapté à l'âge et aux capacités cognitives de l'enfant. Le parent accompagnant doit lire et signer la lettre d'information ainsi que le formulaire de recueil du consentement éclairé.

Pour les enfants de 6 ans et plus, capables de lire la lettre d'information, l'information est donnée à l'oral, avec un discours adapté à l'âge et aux capacités cognitives de l'enfant, mais également au travers d'une lettre d'information simplifiée que l'enfant doit lire et signer. Le parent accompagnant doit lire et signer la lettre d'information ainsi que le formulaire de recueil du consentement éclairé.



	<b>Information écrite et/ou orale</b>	<b>Recueil de consentement</b>
<b>Enfants de moins de 6 ans</b> OU <b>Enfant de 6 ans et plus ne sachant pas lire</b>	✓ <b>Enfant :</b> Information orale adaptée à l'âge et aux capacités cognitives de l'enfant ✓ <b>Parent accompagnant :</b> Lettre d'information	✓ <b>Parent accompagnant</b> Consentement éclairé écrit
<b>Enfants de 6 ans et plus, capables de lire la lettre d'information</b>	✓ <b>Enfant :</b> Information orale adaptée à l'âge + lettre d'information simplifiée ✓ <b>Parent accompagnant :</b> Lettre d'information	

Tableau 2.2-3 : Modalités d'information des enfants inclus et des parents accompagnants, et de recueil de consentement des parents accompagnants

### 2.2.3 Modalités d'évaluation

Toute évaluation de la fonction d'équilibration débute par l'information orale et/ou écrite de l'enfant et de son parent accompagnant. Il s'ensuit la signature de la lettre d'information et du recueil de consentement éclairé par le parent accompagnant. L'ensemble des évaluations cliniques, fonctionnelles et instrumentées, sont menées par la doctorante/kinésithérapeute expérimentée en neurologie pédiatrique, pour tous les enfants inclus.

#### 2.2.3.1 Recueil de données cliniques

Les informations cliniques de chaque patient inclus sont recueillies dans le dossier médical de l'enfant, et au besoin complétées auprès du parent accompagnant. Les informations recueillies sont les suivantes :

- La date de naissance
- Le GMF-CS (I, II ou III)
- La topographie de l'atteinte (monoparésie, diparésie, triparésie, quadriparésie)
- Le tableau neurologique (spastique pure ou mixte)
- Le mode de garde / la scolarité

#### 2.2.3.2 Evaluation clinique analytique : mesures anthropométriques, amplitudes articulaires et longueurs musculaires, spasticité aux membres inférieurs

##### 2.2.3.2.1 Mesures anthropométriques

Une fois le patient dévêtu en sous-vêtements, l'examineur procède aux mesures anthropométriques suivantes, à l'aide d'un pèse-personne mécanique, et d'un mètre ruban :

- Poids (kg)
- Taille (mm)
- Longueur du segment fémoral G et D (base du grand trochanter – condyle externe) (mm)
- Longueur du segment tibial G et D (condyle externe – malléole externe) (mm)
- Longueur du pied G et D (mm)

#### 2.2.3.2.2 Evaluation des amplitudes articulaires passives et longueurs musculaires aux Membres Inférieurs

Chaque enfant est installé sur une table d'examen, en position allongée et aussi détendu que possible. En décubitus dorsal, la tête est maintenue en position d'inclinaison et de rotation neutres afin d'éviter de provoquer toute contraction musculaire ou mouvement involontaire du tronc ou des membres. Pour les mêmes raisons, la tête est tournée du côté du membre inférieur examiné en décubitus ventral (oreille gauche posée sur la table d'examen pendant l'évaluation du MI droit, oreille droite posée sur la table d'examen pendant l'évaluation du MI gauche).

Des mesures d'amplitudes articulaires aux genoux et aux articulations talo-crurales sont effectuées en bilatéral, pour les enfants présentant une atteinte bilatérale (diparésie, triparésie, quadriparésie), comme pour ceux présentant une atteinte unilatérale (monoparésie, hémiparésie). En effet, la lésion cérébrale précoce à l'origine de la PC, peut être à l'origine de troubles du tonus et/ou du mouvement aussi aux membres décrits comme non parétiques.

Les mesures d'amplitudes articulaires sont effectuées à l'aide d'un goniomètre, outil clinique le plus couramment utilisé dans l'évaluation des mouvements articulaires, en raison de sa facilité d'utilisation, de son faible coût et de ses niveaux raisonnables de fiabilité et de validité dans de nombreuses études (Keogh et al. 2019; Hancock, Hepworth, et Wembridge 2018; Gajdosik et Bohannon 1987; Norkin et White 2016). Les biais potentiels de mesures goniométriques peuvent provenir d'erreurs de positionnement des branches du goniomètre (le goniomètre n'est généralement pas assez long pour être aligné directement avec les points de repère anatomiques), de difficultés à repérer les structures anatomiques à utiliser comme points de référence pour placer les branches du goniomètre, d'éventuelles compensations involontaires du patient, ou encore le manque d'expérience clinique de l'évaluateur (Gajdosik et Bohannon 1987; Konor et al. 2012; Gerhardt et Rondinelli 2001).

Cliniquement, certaines longueurs musculaires peuvent être évaluées indirectement par des mesures d'amplitudes articulaires (Norkin et White 2016; Shamsi, Mirzaei, et Khabiri 2019). Ainsi dans ce protocole de recherche, nous avons évalué (Tableau 2.2-4) :

- ✓ La longueur du muscle Droit Fémoral par la mesure de l'amplitude articulaire en flexion de genou, hanche en extension en décubitus ventral
- ✓ La longueur des muscles ischio-jambiers par la mesure de l'amplitude articulaire en extension de genou, à 90° de flexion de hanche
- ✓ La longueur du muscle soléaire par la mesure de l'amplitude articulaire en flexion dorsale de la talo-crurale, en flexion de genou
- ✓ La longueur des muscles gastrocnémiens par la mesure de l'amplitude articulaire en flexion dorsale de la talo-crurale, en extension de genou.



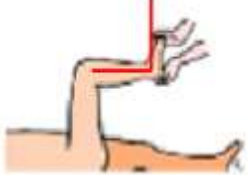

La même position d'évaluation...	A Vitesse lente (V1)		A Vitesse rapide (V3)	Schéma
	Mesure goniométrique de l'amplitude articulaire	Evaluation indirecte de la longueur musculaire	Evaluation du tonus musculaire (MAS)	
<b>Décubitus Ventral</b>	Amplitude articulaire en flexion de genou, hanche tendue Contre-prise sacrée pour éviter l'ascension du bassin	Longueur du muscle Droit Fémoral G et D	Spasticité du muscle Droit Fémoral G et D Angle poplité	
<b>Décubitus Dorsal</b>	Amplitude articulaire en extension de genou, hanche fléchie à 90° MI controlatéral maintenu en extension sur la table	Longueur des muscles Ischio-Jambiers G et D	Spasticité des muscles Ischio-Jambiers G et D	
	Amplitude articulaire de la talo-crurale, en flexion de genou L'arrière-pied est maintenu en position neutre	Longueur des muscles Gastrocnémiens G et D	Spasticité des muscles Gastrocnémiens G et D	
	Amplitude articulaire de la talo-crurale, en flexion de genou L'arrière-pied est maintenu en position neutre, pour éviter le valgus ou varus du calcaneum	Longueur du muscle Soléaire G et D	Spasticité du muscle Soléaire G et D	

Tableau 2.2-4 : Modalités d'évaluation clinique des amplitudes articulaires, longueurs et tonus musculaires aux Ischio-jambiers, Droit Fémoral, Soléaire et Gastrocnémiens

### 2.2.3.2.3 Evaluation de la spasticité musculaire aux Membres Inférieurs

Selon la définition de Lance, la spasticité correspond à un trouble moteur caractérisé par l'augmentation vitesse-dépendante du réflexe tonique d'étirement du muscle (Lance 1980; H. K. Graham et al. 2016). La Modified Ashworth Scale (MAS) est une échelle d'évaluation de la spasticité en 6 points (0, 1, 1+, 2, 3, 4) qui évalue le tonus musculaire, par mobilisation passive de l'articulation dans toute son amplitude et cotation clinique de la résistance au mouvement (Tableau 2.2-5). Afin de normaliser la vitesse de mobilisation passive, et donc d'étirement imposée au muscle évalué, chaque mobilisation est effectuée en une seconde (R. W. Bohannon et Smith 1987).

MAS	m-MAS	Description
0	0	No increase in muscle tone
1	1	Slight increase in muscle tone, with a catch and release or minimal resistance at the end of the range of motion when an affected part(s) is moved in flexion or extension
1+	2	Slight increase in muscle tone, manifested as a catch, followed by minimal resistance through the remainder (less than half) of the range of motion
2	3	A marked increase in muscle tone throughout most of the range of motion, but affected part(s) are still easily moved
3	4	Considerable increase in muscle tone, passive movement difficult
4	5	Affected part(s) rigid in flexion or extension

Tableau 2.2-5 : Cotation de la spasticité musculaire selon la Modified Ashworth Scale (R. W. Bohannon et Smith 1987)

De façon bilatérale et suivant les recommandations de la littérature, nous avons évalué à l'aide de la Modified Ashworth Scale (MAS), la spasticité des muscles fléchisseurs et extenseurs de genoux, et fléchisseurs plantaires et dorsaux de la talo-crurale, car ils sont fréquemment le siège d'hypertonie chez les enfants avec PC (Shamsoddini et al. 2014) (Tableau 2.2-4):

- ✓ évaluation de la spasticité du Droit Fémoral (Szopa et al. 2014; Drefus et al. 2018)
- ✓ évaluation de la spasticité des Ischio-jambiers (Fosdahl et al. 2020; Bowal et al. 2021)
- ✓ évaluation de la spasticité du Triceps Sural (Soléaire + Gastrocnémiens) (Horsch et al. 2019).

La MAS est l'échelle clinique d'évaluation de la spasticité la plus couramment utilisée en pratique clinique neurologique. En effet, elle est facile d'utilisation et a montré de bonnes qualités psychométriques inter et intra-observateur dans de nombreuses études (Lindén et al. 2019; Scholtes et al. 2006; Yoo 2022; Harb et Kishner 2020; Meseguer-Henarejos et al. 2018). Cependant, la fiabilité de l'utilisation de la MAS chez les enfants avec PC spastique est remise en question dans certaines études, celle-ci variant considérablement en fonction du muscle évalué (Alhusaini et al. 2010; Mutlu 2008; Yam et Leung 2006; Numanoglu et Günel 2012; Yoo 2022). Enfin, il existe des controverses sur l'interprétation des résultats de cette échelle. En effet, la résistance perçue peut être causée aussi bien par des causes neurologiques que biomécaniques, que par des origines neurales et/ou biomécaniques, que le MAS pourrait ne pas distinguer (De Gooijer-van de Groep 2013).

À des fins statistiques, les scores de MAS ont été transformés d'une échelle de 0 à 4 (0, 1, 1+, 2, 3, 4) en une échelle de 0 à 5 (0, 1, 2, 3, 4, 5) (Ansari et al. 2022). Puis pour chaque enfant évalué, les scores de

spasticité attribués pour chaque muscle, ont été considérés comme une variable ordinale et additionnés dans un score composite de spasticité (Figure 2.2-1).

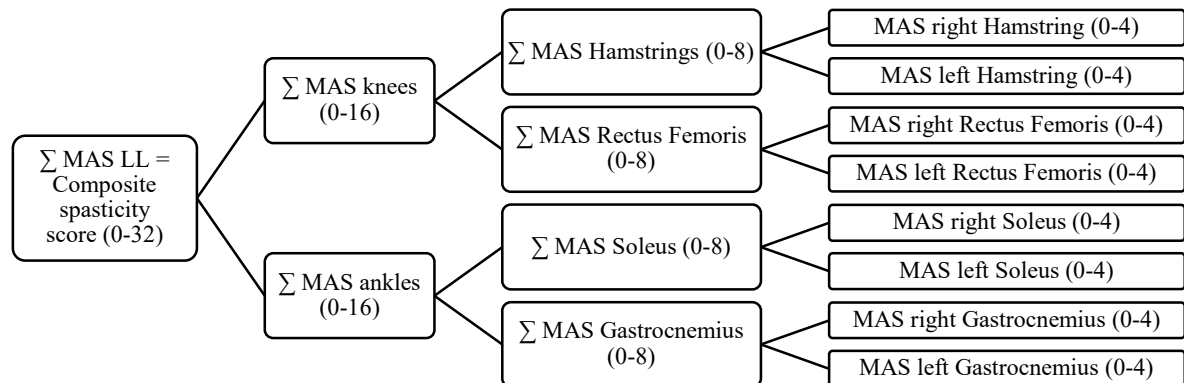


Figure 2.2-1 : Score composite de spasticité calculé pour chaque patient évalué

### 2.2.3.3 Evaluation clinique fonctionnelle de la fonction d'équilibration par la Pediatric Balance Scale

La Pediatric Balance Scale (PBS) est la version modifiée et adaptée à la pédiatrie de la Berg Balance Scale (BBS), qui elle est largement utilisée en neurologie adulte et en gériatrie (K. O. Berg et al. 1992; Blum et Korner-Bitensky 2008) dans l'évaluation fonctionnelles des troubles de l'équilibre. De la BBS à la PBS, les modifications suivantes ont été menées (Franjoine 2003; Darr et al. 2015; Yi et al. 2012): réorganisation de l'ordre des items pour entretenir la motivation des enfants au cours de l'évaluation, diminution des temps standards de maintien des postures statiques, clarification et standardisation des consignes de passation pour les évaluateurs, simplification de la formulation de chaque item pour les rendre plus accessibles à la population pédiatrique, ajout de consignes pour maintenir l'attention des enfants au cours du test.

La PBS est une échelle d'évaluation fonctionnelle de l'équilibre des enfants, à partir de l'âge de 2 ans. Elle permet d'identifier et d'évaluer les troubles de l'équilibre d'enfants présentant des troubles moteurs légers à modérés (Franjoine 2003; Darr et al. 2015). Le concept d'équilibre fonctionnel tel que défini par Franjoine et al. en 2003, correspond à la capacité de l'enfant à maintenir son contrôle postural au cours de ses AVQ, ses activités scolaires et de jeux au domicile, à l'école, avec ses amis etc...(Franjoine 2003) Ainsi, la PBS est particulièrement adaptée pour évaluer la fonction d'équilibration fonctionnelle d'enfants présentant une PC, détecter ses modifications au cours du temps (croissance, interventions thérapeutiques...) et éventuellement identifier un besoin spécifique de rééducation motrice. Enfin, la PBS présente une excellente fiabilité inter et intra-évaluateur (C. Chen et al. 2013; Pavao 2014; Yi et al. 2012; Franjoine 2003; Duarte 2014).

La PBS est composée de 14 items de difficulté progressive, évaluant de nombreux aspects des activités fonctionnelles de l'enfant allant du temps de maintien de la station assise à l'évaluation de la capacité à tenir sur un pied. Pour chaque item, un score de 0 (mauvais) à 4 (bon) permet une évaluation qualitative et quantitative de la performance permettant d'évaluer la variabilité des capacités d'équilibration. La somme des scores aux différents items permet d'obtenir un score global d'équilibre fonctionnel sur 56 points (Franjoine 2003; Darr et al. 2015).

La passation du PBS ne nécessite que très peu de matériel (objets usuels de salle de rééducation) et d'espace. L'évaluation et son interprétation sont rapides (15 à 20 minutes) et ne nécessitent pas de formation particulière de l'évaluateur (Pavao 2014; Franjoine 2003; Darr et al. 2015). Les différentes tâches évaluées dans la PBS sont les suivantes :

1. Transfert assis-debout
2. Transfert debout-assis
3. Transfert d'un chaise à l'autre
4. Station statique debout
5. Station statique assis
6. Station statique debout yeux fermés
7. Station statique debout pieds joints
8. Station statique debout pieds en tandem
9. Station statique debout sur un pied
10. Tour sur soi-même d'un côté et de l'autre
11. Regarder derrière par-dessus son épaule d'un côté et de l'autre
12. Ramasser un objet par terre
13. Poser un pied puis l'autre alternativement sur une marche
14. Se pencher en avant, bras tendus (limite de stabilités antérieure)

Enfin, la PBS peut être divisée en sous-scores : la PBS statique composée des items 4 à 9, et la PBS dynamique, composée des items 1 à 3 et 10 à 14 (Darr et al. 2015; Shim et al. 2022; Jantakat et al. 2014; Franjoine et al. 2022).

#### **2.2.3.4 Evaluation posturographique de la fonction d'équilibration, en conditions statique et dynamique**

##### **2.2.3.4.1 Dispositif d'évaluation posturographique de la fonction d'équilibration**

Le dispositif d'évaluation posturographique statique et dynamique est composé d'un tapis de mesure de pression matricielle Matscan®, d'une plateforme robotisée de perturbation posturale, d'un système de synchronisation (Vicon Lock +) de la plateforme robotisée et du tapis Matscan® et d'une structure aluminium et d'un dispositif de sécurité par harnais (Figure 2.2-5).

##### ✓ Tapis de mesure de pression matricielle Matscan®

Le tapis Matscan® (Tekscan Inc., South Boston, États-Unis), est un tapis de mesure de pression matricielle qui capture les pressions plantaires, les forces et les déplacements des centres de pressions sous chaque pied (pied G et pied D). Le système Matscan® dispose de 2288 capteurs de pression alignés sur 44 lignes et 52 colonnes, avec une résolution spatiale de 1,4 capteurs/cm<sup>2</sup>. Il peut enregistrer à une fréquence d'échantillonnage allant jusqu'à 100 Hz. Les caractéristiques techniques du tapis Matscan® sont résumées dans le Tableau 2.2-6. Le tapis de mesure de pression matricielle Matscan® a démontré une grande précision et une fiabilité modérée à bonne (Giacomozzi 2010; Zammit, Menz, et Munteanu 2010; Kumar et al. 2014; Goetschius et al. 2018; Hafer et al. 2013).

<b>Modèle capteur</b>	3150 / 3150E
<b>Technologie</b>	Résistive
<b>Gamme Pression</b>	125 Psi / 8,5 Bars
<b>Cellules sensibles</b>	2288
<b>Epaisseur</b>	6 mm
<b>Echantillonnage</b>	100Hz / 440 Hz
<b>Connexion</b>	USB 2.0

**Tableau 2.2-6 : Caractéristiques du tapis de mesure de pression matricielle Matscan®**

Son installation est rapide par connexion USB vers un ordinateur. Après étalonnage basé sur les recommandations du fabricant, la pression a été enregistrée dans des conditions quasi-statiques (patient debout immobile, sans perturbation induite par la plateforme) puis dynamiques (patient debout immobile, avec perturbations induites par la plateforme). Les enregistrements ont été réalisés à une fréquence d'échantillonnage de 50 Hz et l'analyse a été réalisée à l'aide du logiciel FootMat® Research Software (Figure 2.2-2).

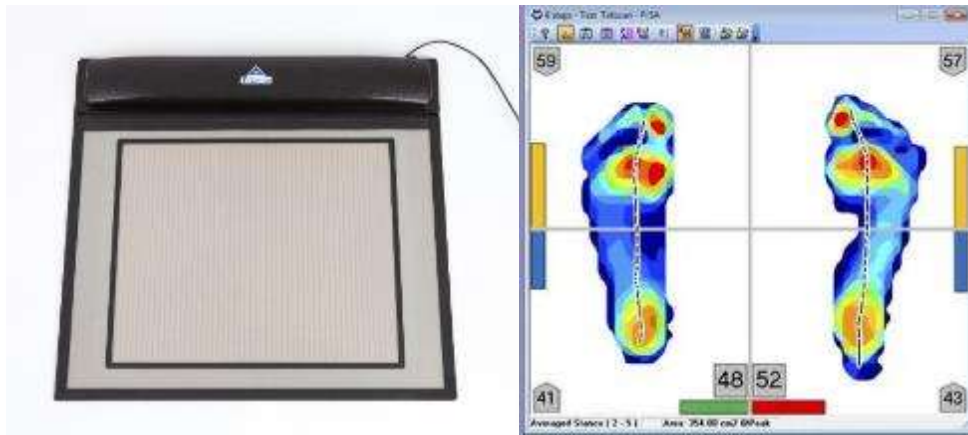


Figure 2.2-2 : A gauche système de mesure de pression matricielle Matscan®, à droite interface du logiciel FootMat® Research Software

✓ Plateforme robotisée de perturbation posturale

La plateforme robotisée de perturbation posturale est constituée d'un plateau mobile à 4 degrés de liberté (Figure 2.2-3). Ce système motorisé est équivalent à un robot en interaction avec l'humain dont les lois de commande sont élaborées de façon à générer des perturbations dynamiques. Elle peut s'apparenter à des plateformes telles que l'Equitest, largement utilisée en pratique clinique et en recherche (B. Müller, Geißler, et Guntinas-Lichius 2016; Ferber-Viart et al. 2007; Ionescu, Dubreuil, et Ferber-Viart C 2005).

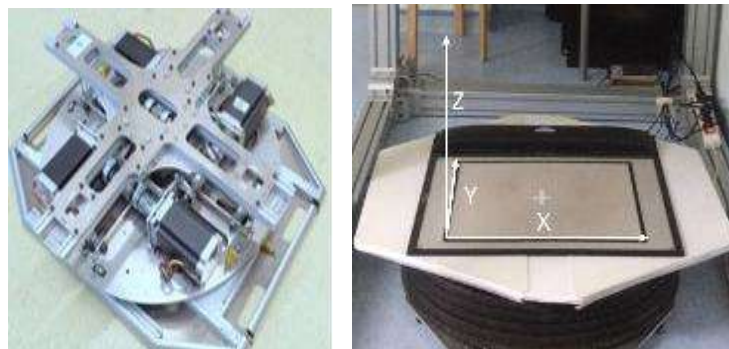


Figure 2.2-3: Plateforme robotisée de perturbation posturale. A gauche une vue intérieure, à droite une vue de la plateforme assemblée

La plateforme robotisée de perturbation posturale induit des déstabilisations programmées et commandées via une interface informatique (en durée, en fréquence et en amplitude) pour être de difficulté croissante et adaptées au sujet évalué. Les différents mouvements générés par la plateforme sont des rotations suivant les axes X, Y et Z et des translations suivant l'axe Y uniquement. C'est pourquoi les perturbations posturales en translation selon l'axe X (Tx) ont été réalisées après une rotation à 90° de la plateforme dans le sens anti-horaire. Les caractéristiques techniques de la plateforme robotisée sont résumées dans le Tableau 2.2-7.

<b>Classification du dispositif</b>	Dispositif médical de classe IIA. Dispositif non pourvu de marquage CE
<b>Plateau mobile</b>	Hauteur 250mm Largeur 800 mm Longueur 900 mm
<b>Moteurs</b>	4 de type 86 J 18 118 - 842 - 01
<b>Variateurs</b>	4 de type 8056 DMD
<b>Poids</b>	50kg
<b>Charge maximale supportée</b>	90kg
<b>Mobilités</b>	Translations suivant Y Rotations suivant X, Y, Z
<b>Energie</b>	Branchement sur secteur

Tableau 2.2-7 : Caractéristiques techniques de la plateforme robotisée de perturbation posturale

L'amplitude et la vitesse des mouvements que la plateforme robotisée peut produire ne présentent aucun danger pour les patients. De par son architecture mécanique, la plateforme ne peut entrer en collision ni avec les patients ni les évaluateurs. L'évaluateur est par ailleurs en permanence à côté du patient évalué et prêt à enclencher l'arrêt d'urgence si nécessaire. Deux dispositifs d'arrêt d'urgence sont actionnables, le premier étant relié au patient et déclenché en cas de chute, le second se situant à portée de l'évaluateur à proximité de l'ordinateur de commande.

✓ système de synchronisation de la plateforme robotisée et du tapis Matscan®

Un dispositif de synchronisation via un boîtier de contrôle Vicon Lock+, permet de coupler le lancement des acquisitions par le tapis MatScan® avec le démarrage de la plateforme robotisée (Figure 2.2-4).

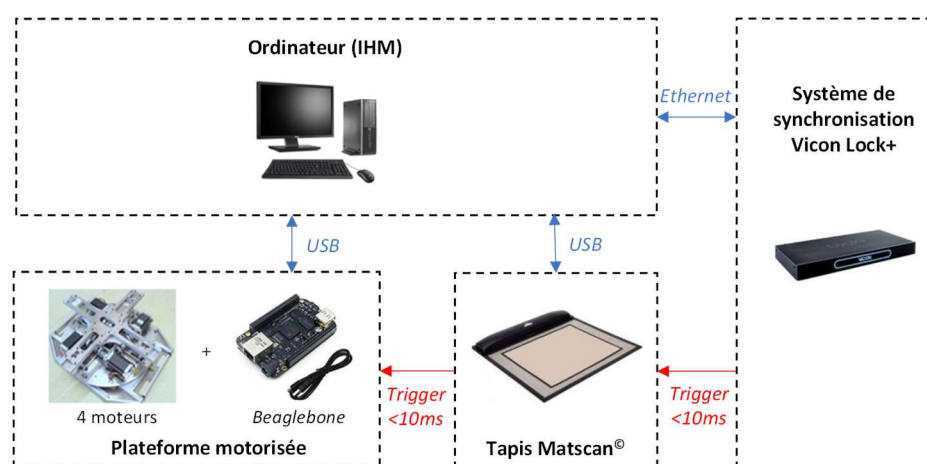


Figure 2.2-4 : Dispositif de synchronisation du Tapis MatScan® avec la plateforme de robotisée de perturbation posturale



✓ Structure aluminium d'accès à la plateforme et harnais de sécurité

Une structure en aluminium a été conçue et construite en matériaux Norcan®, afin de sécuriser l'accès et l'utilisation de la plateforme robotisée (Figure 2.2-5). Elle comprend un système de rampes de différentes hauteurs et un marchepied pour faciliter l'accès à la plateforme. Celle-ci permet également l'installation d'un harnais de sécurité ajustable permettant à chaque enfant évalué d'être en sécurité. Ce harnais permet de prévenir toute chute de la plateforme si l'enfant venait à être déséquilibré suite aux mouvements induits par la plateforme. Celui-ci est fixé en hauteur sur les montants de la structure Norcan®.

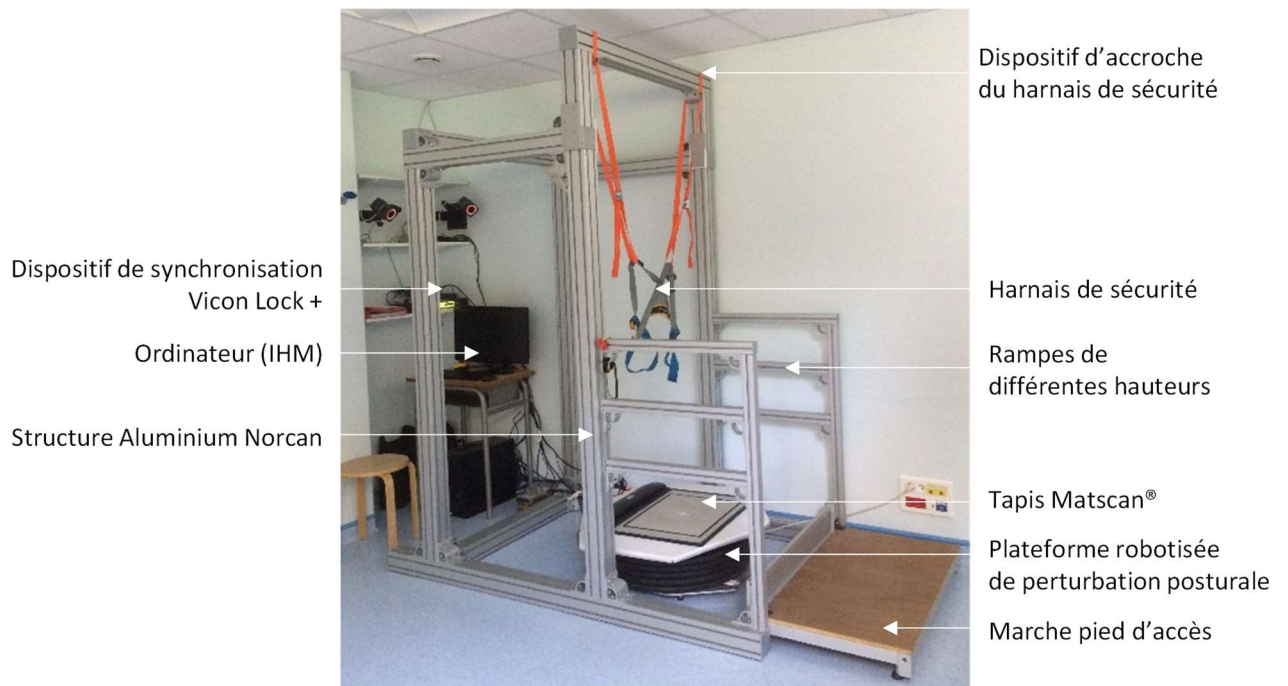


Figure 2.2-5: Dispositif général d'évaluation posturographique

**2.2.3.4.2 Evaluation de l'équilibre statique, sans perturbation induite par la plateforme robotisée**

Pendant la durée d'évaluation posturographique statique, les accompagnants (et éventuellement autres personnes présentes dans la salle) sont invités à ne pas interagir avec l'enfant, ni faire de bruit et/ou mouvement pouvant les déconcentrer. Il est demandé aux enfants de se tenir debout, pieds écartés de la largeur du bassin, bras le long du corps sans appuis des membres supérieurs sur la structure Norcan et regard droit devant.

L'équilibre statique, sans perturbation induite par la plateforme de perturbation posturale, est évalué selon les 3 sous-évaluations suivantes (Figure 2.2-6):

- ✓ **Une minute avec les yeux ouverts (YO).** La consigne est de « rester debout aussi immobile que possible en fixant le petit visage jaune » placé face au patient à hauteur de regard. La hauteur du smiley jaune étant modifiée pour chaque enfant évalué.
- ✓ **Une minute avec les yeux fermés (YF).** La consigne est de « rester debout aussi immobile que possible », avec un bandeau sur le visage permettant de s'assurer de l'obstruction totale de la vision.
- ✓ **Une minute avec les yeux ouverts, sur mousse de perturbation posturale à mémoire de forme Airex Balance Pad® (dimensions L48x l 39.9 x H 6.1 centimètres) (M).** La consigne est de « rester debout aussi immobile que possible en fixant le petit visage jaune » placé face au patient à hauteur de regard. La hauteur du smiley jaune étant modifiée pour chaque enfant évalué.

Les patients peuvent demander à descendre de la plateforme à tout moment au cours de la sous-évaluation et quelle qu'en soit la raison. Des temps de pause sont proposés entre chaque sous-évaluation. La sous-évaluation est considérée comme réalisée avec succès lorsque l'enfant est resté en équilibre sans décoller les pieds du tapis Matscan®. Le décollage d'au moins un pied au cours de la sous-évaluation étant suffisant pour considérer un échec. Pour chaque sous-évaluation, le patient a le droit à 2 essais. La sous-évaluation YO est toujours testée la première du protocole d'évaluation statique. La sous-évaluation YF est testée lorsque la sous-évaluation YO a été réalisée avec succès au cours du premier ou second essai. Il en est de même pour la sous-évaluation sur mousse de perturbation posturale.

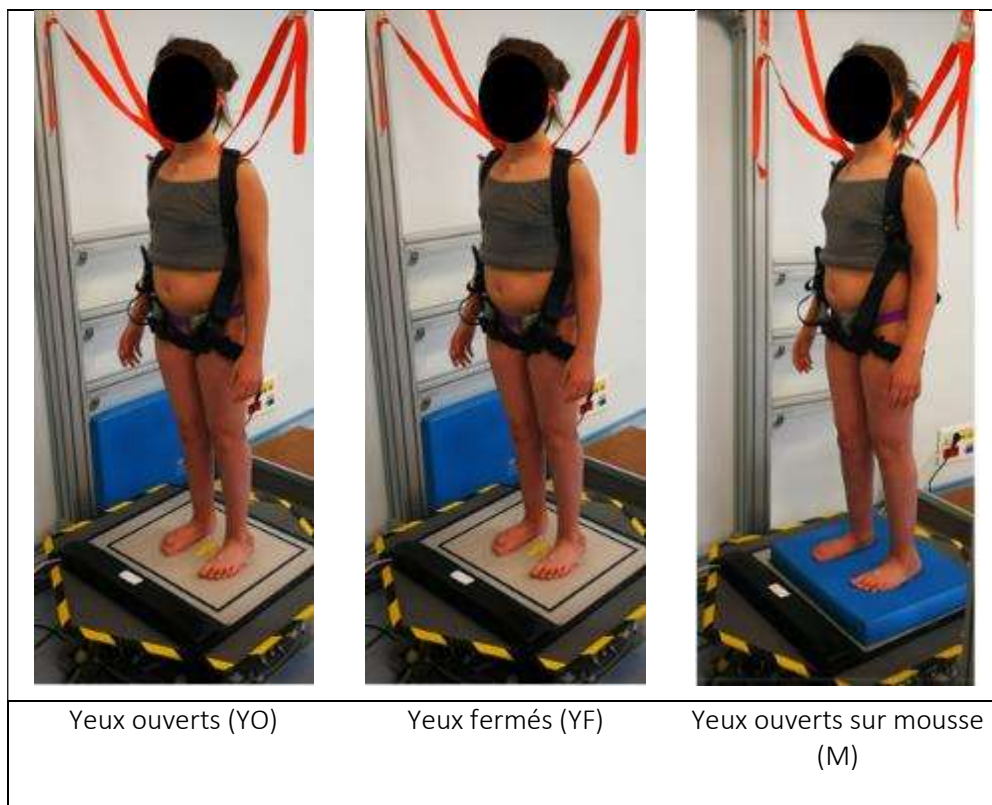


Figure 2.2-6 : Evaluation de l'équilibre statique, yeux ouverts, yeux fermés, puis sur mousse de perturbation posturale

#### 2.2.3.4.3 Evaluation de l'équilibre dynamique, avec perturbations induites par la plateforme robotisée

L'évaluation de l'équilibre dynamique, consiste en une succession de 4 sous-évaluations :

- ✓ BFBA : Basse Fréquence, Basse Amplitude
- ✓ BFHA : Basse Fréquence, Haute Amplitude
- ✓ HFBA : Haute Fréquence, Basse Amplitude
- ✓ HFHA : Haute Fréquence, Haute Amplitude

Chacune de ces sous est composée de 5 types de perturbations induites par la plateforme :

- ✓ Rotations suivant X (Rx)
- ✓ Rotations suivant Y (Ry)
- ✓ Rotations suivant Z (Rz)
- ✓ Translation suivant X (Tx)
- ✓ Translation suivant Y (Ty)

Les sous-évaluations ont été réalisées dans l'ordre décrit dans le Tableau 2.2-8, et pour chacune d'entre elles, les perturbations ont été ordonnées dans un ordre différent non communiqué au patient de façon à rendre ces perturbations « aléatoires » et non anticipables par ce dernier. Entre chaque perturbation, un temps de pause de 5 secondes a été respecté. Les pauses pré/post perturbation Tx sont majorées du temps que met la plateforme pour faire la rotation à 90° nécessaire pour obtenir le bon axe de translation dans le référentiel du Matscan®.

La consigne est de « rester debout aussi immobile que possible en fixant le petit visage jaune » placé face au patient à hauteur de regard, la hauteur du smiley jaune étant modifiée pour chaque enfant évalué. Les patients peuvent demander à descendre de la plateforme à tout moment au cours de la sous-évaluation et quelle qu'en soit la raison. Des temps de pause sont proposés entre chaque sous-évaluation.

Sous-évaluation	Ordre perturbations	Durée (s)	Difficulté
BFHA	RyRzRxTxTy	~ 150 s	1
HFBA	TyRxRzTxRy	~ 155 s	2
BFHA	TxRxRyTyRz	~ 165 s	
HFHA	RzTxTyRxRy	~ 160 s	3

		Rotations			Translations	
		Rx	Ry	Rz	Tx	Ty
Fréquence	BF	0,2 Hz	0,2 Hz	0,2 Hz	0,2 Hz	0,2 Hz
	HF	0,4 Hz	0,4 Hz	0,4 Hz	0,4 Hz	0,4 Hz
Amplitude	BA	[-5° ; +5°]	[-5° ; +5°]	[-15° ; +15°]	[-5cm ; +5cm]	[-5cm ; +5cm]
	HA	[-10° ; +10°]	[-10° ; +10°]	[-30° ; +30°]	[-10cm ; +10cm]	[-10cm ; +10cm]

Tableau 2.2-8 : Descriptions et caractéristiques (fréquences et amplitudes) des perturbations induites par la plateforme robotisée pour chaque sous-évaluation

La sous-évaluation est considérée comme réalisée avec succès lorsque l'enfant est resté en équilibre sans décoller les pieds du tapis Matscan®. Le décollage d'au moins un pied au cours de la sous-évaluation étant suffisant pour considérer un échec. Pour chaque sous-évaluation, le patient a le droit à 2 essais. La sous-évaluation de difficulté 1 est toujours testée la première du protocole d'évaluation dynamique. Les sous-évaluations de difficulté 2 sont testées lorsque la sous-évaluation de difficulté 1 a été réalisée avec succès au cours du premier ou second essai. La sous-évaluation de difficulté 3 est testée lorsque au moins l'une des sous-évaluations de difficulté 2 a été réalisée avec succès au cours du premier ou second essai.

#### 2.2.3.4.4 Traitement des données posturographiques des sous-évaluations

Les données posturographiques temporelles brutes enregistrées par le tapis Matscan® à une fréquence d'échantillonnage ( $f_0$ ) de 50 Hz sont les suivantes :

- ✓ La position du centre de pression du patient selon ses coordonnées ML et AP :  $\overline{CdP}(t)$
- ✓ Le pourcentage d'appui du pied droit :  $\%Appui_d(t)$
- ✓ Le pourcentage d'appui du pied gauche :  $\%Appui_g(t)$

Ces données brutes sont ensuite traitées à l'aide du logiciel Matlab R2022b (9.13.0.2049777, 64-bit win64, August 24, 2022) (Figure 2.2-6).

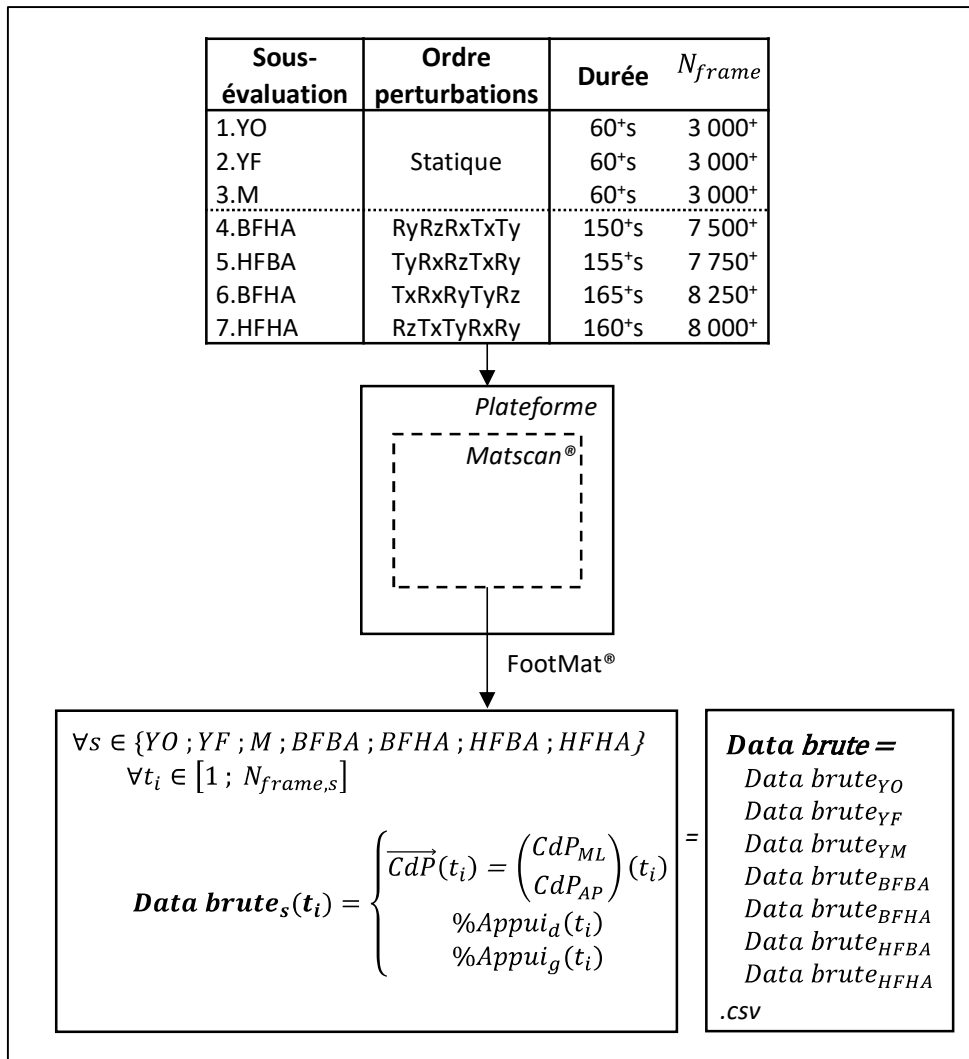


Figure 2.2-6 : Extraction des données brutes posturographiques

Filtration des données (Moreno, Caballero, et Barbado 2022; Quijoux et al. 2021) :

Les séries temporelles  $\overline{CdP}(t)$  sont filtrées par un filtre passe-bas Butterworth d'ordre 4 et de fréquence de coupure 10 Hz afin de s'affranchir du bruit du signal lié notamment à la résolution spatiale du tapis Matscan® (Figure 2.2-7). Les séries temporelles  $\%Appui_a(t)$  et  $\%Appui_g(t)$  ne sont pas filtrées afin de conserver la stricte égalité  $\%Appui_a(t) + \%Appui_g(t) = 100\%$  à chaque instant et car ces dernières sont beaucoup moins « bruitées » et non utilisées dans le calcul d'autres paramètres posturographiques.

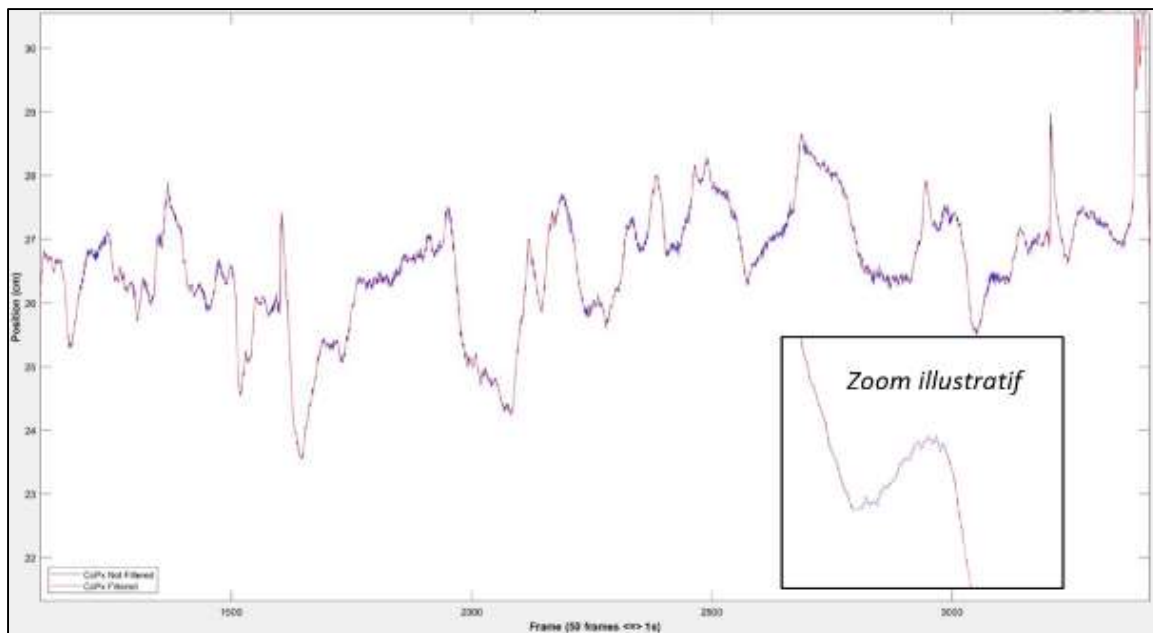


Figure 2.2-7 : Illustration de l'impact du filtre passe bas Butterworth ( $n=4$  ;  $f=10\text{Hz}$ ) sur l'un des signaux  $CdP_{ML}(t)$  (bleu = non filtré ; rouge = filtré)

#### Découpage des séries et standardisation temporelle des données :

Les données sont ensuite traitées dans l'optique de les rendre homogènes et comparables au travers des 3 objectifs suivant (Figure 2.2-8 et 2.2-9):

- ✓ **Retrait des phases de pause « inter perturbations »** des sous-évaluations dynamiques durant lesquelles la plateforme peut se repositionner à  $\pm 90^\circ$  (pré/post Tox) et/ou le patient peut adopter des comportements hors protocole et non reproductibles (retournement vers le parent, distraction...);
- ✓ **Identification et réordonnement des perturbations Rx Ry Rz Tx Ty** qui sont « mélangées » dans des ordres différents dans chaque sous-évaluations ;
- ✓ **Standardisation de la durée des sous-évaluations**
  - YO = 60 sec
  - YF = 60 sec
  - M = 60 sec
  - BFBA\_SESP = 80 sec (= 5 perturbations de 16 secondes)
  - BFHA\_SESP = 80 sec (= 5 perturbations de 16 secondes)
  - HFBA\_SESP = 80 sec (= 5 perturbations de 16 secondes)
  - HFHA\_SESP = 80 sec (= 5 perturbations de 16 secondes)

*SESP = « Série Entière Sans Pause » dans l'ordre standard RxRyRzTxTy*  
*Les perturbations ont été réduites à 16sec au milieu des 20sec réalisées de façon à s'assurer de ne prendre en compte aucune phase de « pause inter perturbation ».*

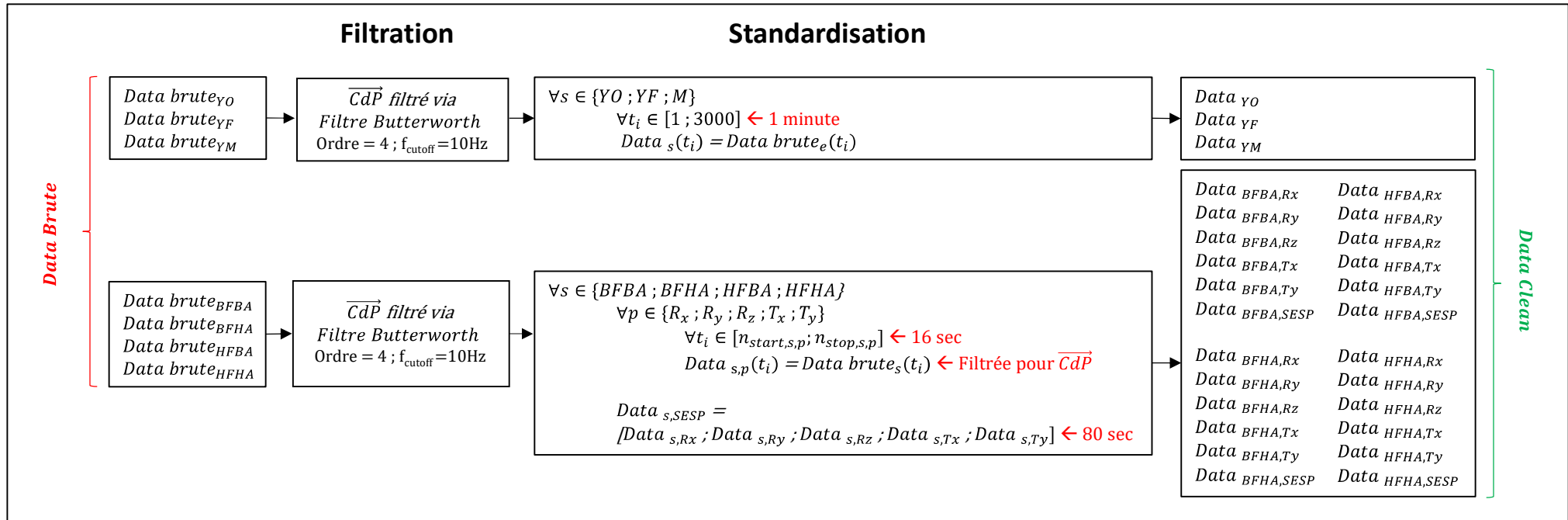


Figure 2.2-8 : Filtration et standardisation des données statiques et dynamiques permettant d'obtenir un ensemble de données homogènes (*Data Clean*)

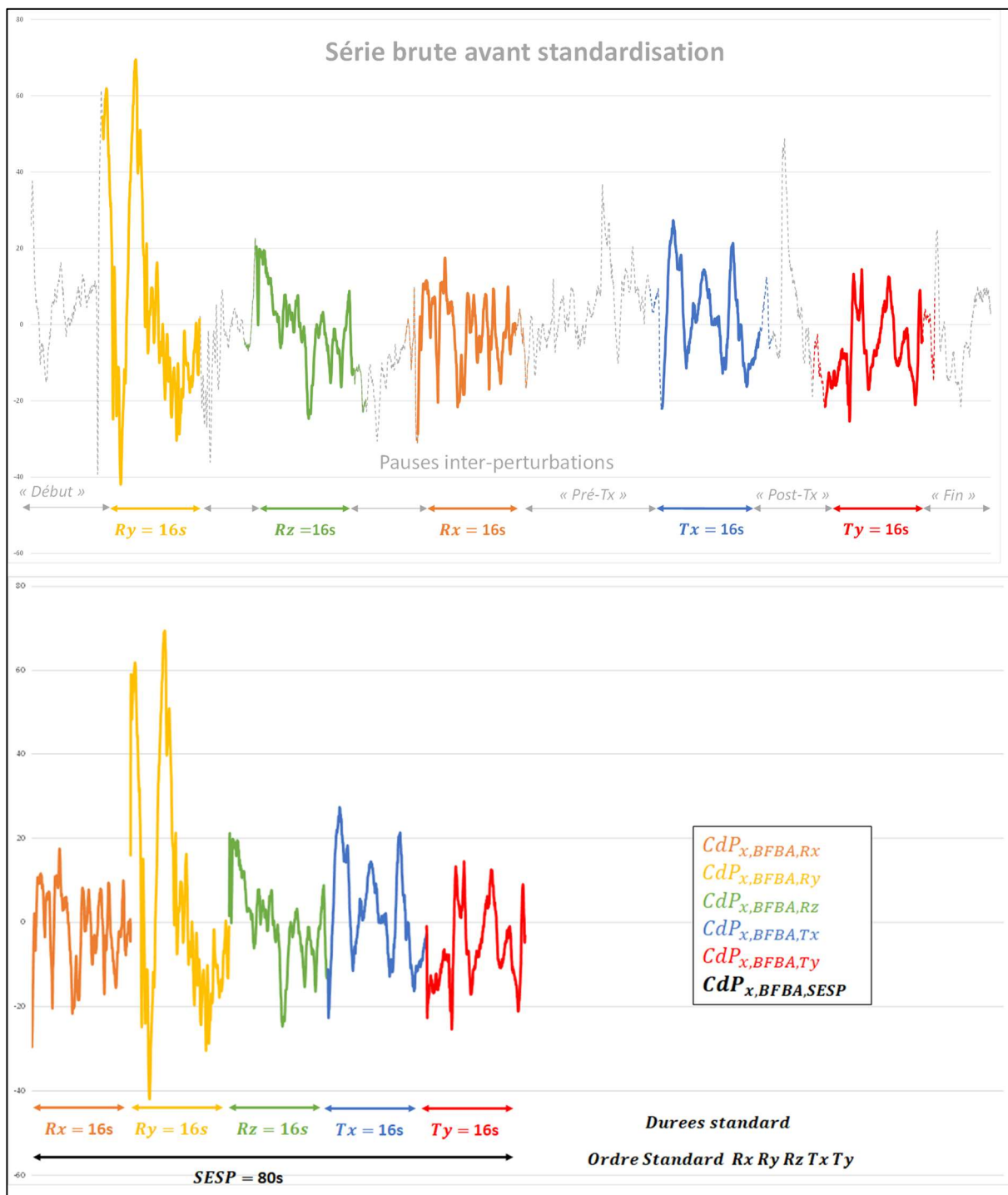


Figure 2.2-9 : Illustration de la standardisation temporelle des données dynamiques  
 Exemple sur  $CdP_{MI}(t)$  d'une sous-évaluation BFBA

Pour chacune des sous-évaluations « s » (*YO ; YF ; M ; BFBA ; BFHA ; HFBA ; HFHA*), et chacune des types de perturbation (aucune perturbation dans les sous-évaluations statiques) quelque (*Statique ; R<sub>x</sub> ; R<sub>y</sub> ; R<sub>z</sub> ; T<sub>x</sub> ; T<sub>y</sub> ; SESP*), les calculs suivants ont été réalisés sur Matlab de façon à pouvoir calculer et représenter les paramètres d'étude posturographiques. Dans la suite des équation,  $t_i \in [1 ; N_s]$  avec  $N_s$  le nombre de frames de la série temporelle étudiée.

Les pourcentages d'appui moyen des pieds droit et gauche sont ainsi calculés de façon à quantifier l'asymétrie (Figure 2.2-10) :

Séries temporelles utilisées	Résultats finaux extraits
$\%Appui_{gauche}(t_i)$	$Asymetrie =  \overline{\%Appui_{gauche}} - \overline{\%Appui_{droit}} $ avec $\overline{\%Appui_{gauche}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} \%Appui_{gauche}(t_i)}{N_s}$ $\overline{\%Appui_{droit}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} \%Appui_{droit}(t_i)}{N_s}$
$\%Appui_{droit}(t_i)$	

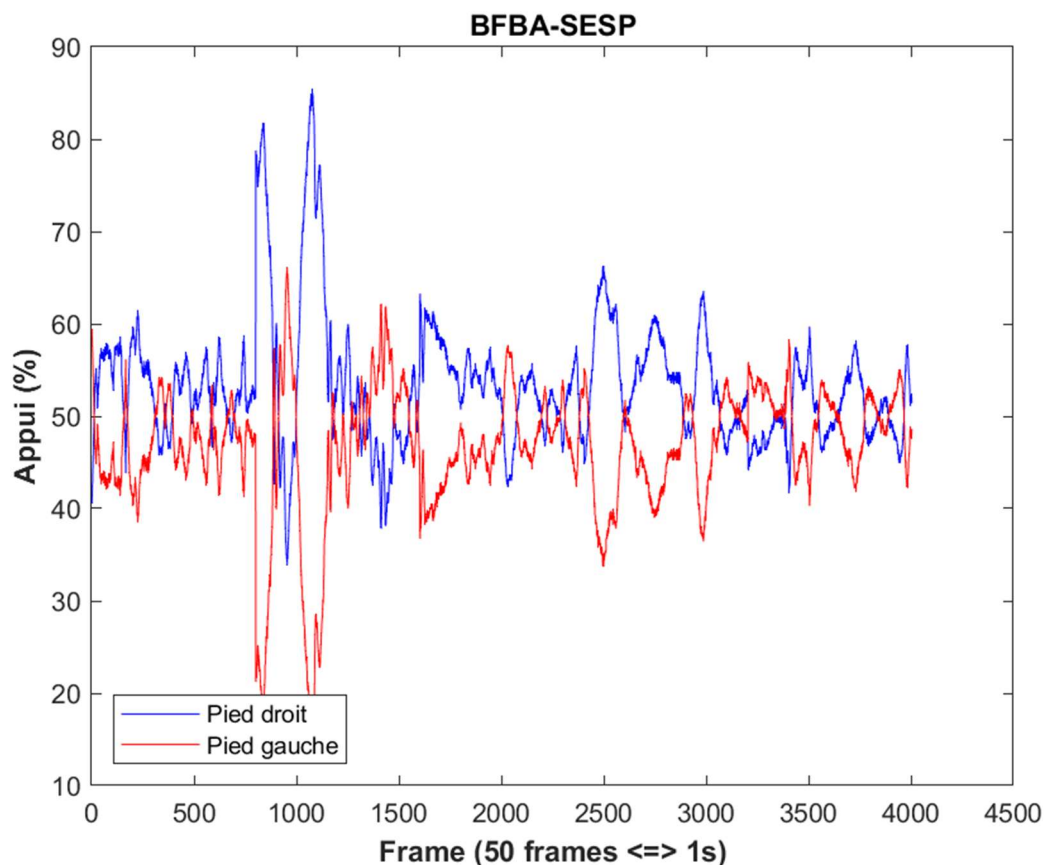


Figure 2.2-10 : Illustration des séries temporelles  $\%Appui_{gauche}$  et  $\%Appui_{droite}$  dans la sous-évaluation BFBA pour un patient donné



Les coordonnées du CdP sont centrées, les coordonnées moyennes de la série temporelle étudiée et les amplitudes de déplacement ML et AP du CdP sont calculées ainsi (Figure 2.2-11) :

Séries temporelles utilisées	Résultats finaux extraits
$CdP_{ML\text{ centré}}(t_i) = CdP_{ML}(t_i) - \overline{CdP_{ML}}$ $\overline{CdP_{ML}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} CdP_{ML}(t_i)}{N_s}$	$Amplitude_{ML} = \max(CdP_{ML}) - \min(CdP_{ML})$
$CdP_{AP\text{ centré}}(t_i) = CdP_{AP}(t_i) - \overline{CdP_{AP}}$ $\overline{CdP_{AP}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} CdP_{AP}(t_i)}{N_s}$	$Amplitude_{AP} = \max(CdP_{AP}) - \min(CdP_{AP})$

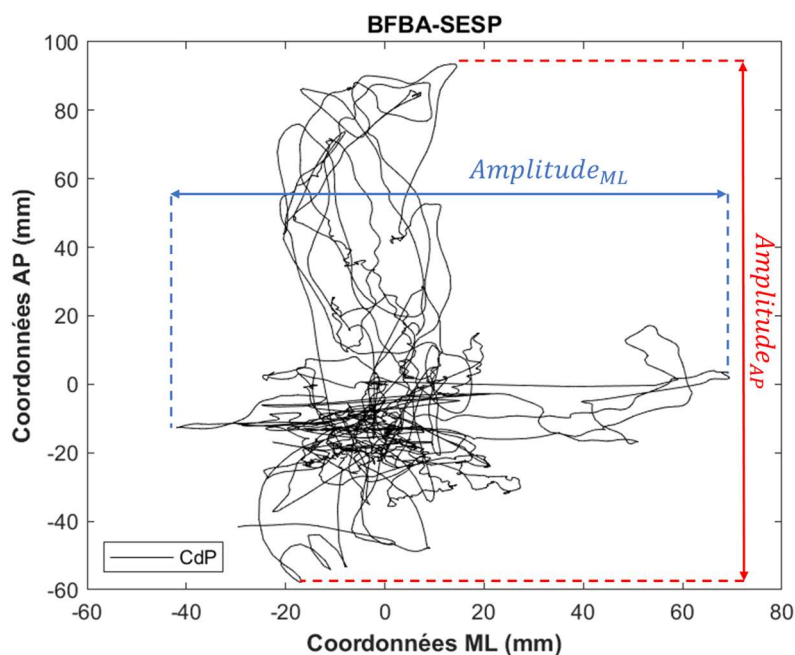


Figure 2.2-11 : Illustration des amplitudes ML et AP du CdP

Les durées des sous-évaluations statiques et dynamiques n'étant pas identiques, les vitesses moyennes du CdP (et ses composantes ML et AP) ont été calculées car les longueurs des statokinésigrammes ne sont pas comparables :

Séries temporelles calculées	Résultats finaux extraits
$V_{ML}(t_i) = \frac{CdP_{ML}(t_{i+1}) - CdP_{ML}(t_i)}{1/f_0}$	$V_{ML} = \frac{\sum_{i=1}^{N_s}  V_{ML}(t_i) }{N_s}$
$V_{AP}(t_i) = \frac{CdP_{AP}(t_{i+1}) - CdP_{AP}(t_i)}{1/f_0}$	$V_{AP} = \frac{\sum_{i=1}^{N_s}  V_{AP}(t_i) }{N_s}$
$V_{CdP}(t_i) = \sqrt{V_{ML}(t_i)^2 + V_{AP}(t_i)^2}$	$V_{CdP} = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} V_{CdP}(t_i)}{N_s}$

$f_0 = 50$  Hz (fréquence d'échantillonnage)

La longueur du statokinésigramme, ainsi que celles de ses composantes ML et AP, ont été calculées comme suit et représente le chemin parcouru en mm par le CdP au cours du temps (Figure 2.2-12):

Séries temporelles calculées	Résultats finaux extraits
$L_{serp\ ML}(t_i) =  CdP_{ML}(t_{i+1}) - CdP_{ML}(t_i) $	$L_{serp\ ML} = \sum_{i=1}^{N_s} L_{serp\ ML}(t_i)$
$L_{serp\ AP}(t_i) =  CdP_{AP}(t_{i+1}) - CdP_{AP}(t_i) $	$L_{serp\ AP} = \sum_{i=1}^{N_s} L_{serp\ AP}(t_i)$
$L_{serp}(t_i) = \sqrt{L_{serp\ ML}(t_i)^2 + L_{serp\ AP}(t_i)^2}$	$L_{serp} = \sum_{i=1}^{N_s} L_{serp}(t_i)$

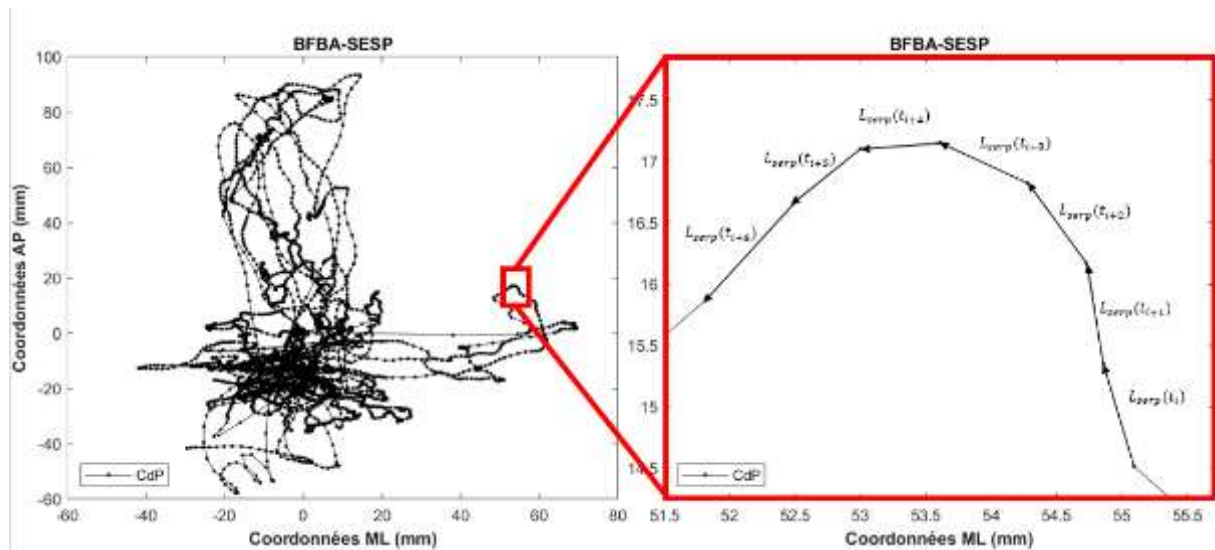


Figure 2.2-12 : Illustration du calcul de la longueur du statokinésigramme du CdP

Enfin, la surface de l'ellipse fait référence à la zone elliptique créée par le traçage des points de données CdP. Il s'agit d'un intervalle de confiance à 95 % qui contient environ 95 % des points de données du CdP. Il s'agit d'une métrique permettant de quantifier la dispersion du CdP au cours du temps qui a été calculée via les formules suivantes :

Séries temporelles calculées	Résultats finaux extraits
$Var(CdP_{ML}) = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} [CdP_{ML}(t_i) - \overline{CdP_{ML}}]^2}{N_s}$	$S_{ellipse\ 95\%} = \pi * 5,99 * \sqrt{Var(CdP_{ML}) * Var(CdP_{AP})}$
$Var(CdP_{AP}) = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} [CdP_{AP}(t_i) - \overline{CdP_{AP}}]^2}{N_s}$	

### 3 Cadre expérimental

#### 3.1 Etude 1 : La spasticité mesurée aux muscles des membres inférieurs d'enfants présentant une Paralyse Cérébrale est-elle un déterminant de leurs capacités fonctionnelles d'équilibration ?

Cette étude observationnelle transversale, explore la relation entre la spasticité des membres inférieurs et l'équilibre fonctionnel chez des enfants de 5 à 12 ans, avec Paralyse Cérébrale de type spastique. Les traitements visant à réduire la spasticité sont souvent considérés comme bénéfiques pour améliorer la fonction, y compris l'équilibre, chez ces enfants. Cependant, la relation entre la spasticité et l'équilibre fonctionnel n'a jamais été entièrement étudiée.

Les résultats de cette étude indiquent une corrélation négative modérée entre la spasticité des membres inférieurs et le score total de l'échelle d'équilibre pédiatrique (PBS). De plus, des corrélations faibles ont été observées entre la spasticité des genoux et des chevilles et les scores de l'équilibre fonctionnel. Ces résultats suggèrent que d'autres facteurs, en plus de la spasticité, contribuent aux troubles de l'équilibre fonctionnel chez les enfants atteints de PC. Il est donc recommandé aux cliniciens d'inclure une évaluation clinique de l'équilibre fonctionnel lors des prises de décisions concernant le traitement de la spasticité dans cette population.

**L'étude ci-après a été soumise au journal « European Journal of Paediatric Neurology »**

#### **Influence of lower limb spasticity on functional balance capacity in children with spastic cerebral palsy: an observational, cross-sectional study**

Audrey Fontaine <sup>a,b</sup>, Arnaud Gouelle <sup>c 1</sup>, Raphaël Pionnier <sup>d 1</sup>, Wael Bachta <sup>a</sup>, Philippe Thoumie <sup>a,e</sup>

<sup>a</sup> ISIR, UMR 7222 CNRS, Agathe Group INSERM U 1150, Sorbonne University, Paris, France

<sup>b</sup> "A Pas de Géants", 75013 Paris, France

<sup>c</sup> Université de Reims Champagne-Ardenne, Laboratory Performance, Santé, Métrologie, Société (PSMS), UFR STAPS, 51000 Reims, France

<sup>d</sup> Unité Fonctionnelle d'Analyse du Mouvement (UFAM), Hôpitaux Nationaux de Saint-Maurice, Saint-Maurice, France.

<sup>e</sup> Department of Physical Rehabilitation Medicine, Sorbonne Université, Rothschild hospital AP-HP, Paris, France; Agathe Isir Lab Inserm U1150, Paris, France.

<sup>1</sup> Both authors contributed equally to this work.

Corresponding author: Audrey Fontaine

Cabinet A Pas de Géants, 68 avenue Edison, 75013 Paris, France

[audrey.fontaine.physio@gmail.com](mailto:audrey.fontaine.physio@gmail.com)

## **Abstract**

**Introduction:** It is commonly believed by clinicians that lower limb (LL) spasticity has a negative effect on balance in children with cerebral palsy (CP). Treatments are often aimed at reducing spasticity to improve function, including balance. However, the relationship between spasticity and functional balance has never been fully investigated.

**Aims:** To investigate the relationship between spasticity and functional balance in children with spastic CP.

**Methods:** We conducted an observational, cross-sectional study of children with unilateral or bilateral spastic CP and Gross Motor Function Classification System (GMFCS) levels I to III in this cross-sectional study. LL spasticity and functional balance were assessed using respectively the Modified Ashworth Scale (MAS) and the Pediatric Balance Scale (PBS). Correlations between three Sum MAS scores – for LL, knees, and ankles – and the PBS total score and PBS sub-scores were investigated through Spearman correlations analysis.

**Results:** 42 children with CP were included (mean age 8.9 years, unilateral/bilateral: 25/17, GMFCS I/II/III: 26/13/3). Moderate negative correlation was observed between sum MAS LL score and PBS total score ( $r = -0.43$ ;  $p = 0.004$ ). Sum MAS knees score and sum MAS ankles score demonstrated respectively a weak negative correlation with dynamic PBS scores ( $r = -0.33$ ;  $p = 0.031$ ) and static PBS scores ( $r = -0.37$ ;  $p = 0.015$ ).

**Discussion:** The weak to moderate relationship between LL spasticity and PBS scores suggests that factors other than spasticity are also involved in the loss of functional balance capacity in children with CP. Our results can help clinicians to include an assessment of functional balance in decisions to treat spasticity.

**Keywords:** Cerebral palsy; Spasticity; Balance; Paediatric balance scale; Children; Lower limbs

## Highlights

- ✓ Impaired balance negatively impacts motor function in children with cerebral palsy.
- ✓ Lower limb spasticity negatively correlates with functional balance capacity in CP.
- ✓ Triceps surae spasticity correlates with static items of the Pediatric Balance Scale.
- ✓ Knee flexor/extensor spasticity correlates with dynamic items of the PBS.
- ✓ Triceps surae spasticity affects static balance in tasks with a small base of support.

## Abbreviations

CP: cerebral palsy  
GMFCS: gross motor function classification system  
LL: lower limbs  
MAS: modified Ashworth scale  
Mild CP: GMFCS I  
Moderate CP: GMFCS II and III  
PBS: paediatric balance scale

## 1. Introduction

Cerebral palsy (CP) is a non-progressive disorder caused by lesions to the developing foetal or infant (0-2 years) brain that leads to permanent disorders of the development of movement and posture (Peter Rosenbaum et al. 2007; H. K. Graham et al. 2016). The most common type is spastic CP, which may be unilateral or bilateral. Spastic CP is reported to affect about 80% of individuals, depending on the CP surveillance network surveyed (Arnaud et al. 2021; « <https://cerebralpalsy.org.au/> », s. d.). In addition to spasticity, children with spastic CP have reduced selective voluntary motor control, and muscle weakness, all of which affect gross motor function (D. R. Patel et al. 2020; Vitrikas, Dalton, et Breish 2020). Sensory processing is frequently altered (Sílvia Leticia Pavão et Rocha 2017), which, along with biomechanical malalignment caused by secondary musculoskeletal pathology (H. K. Graham et al. 2021), interferes with postural control during both static (i.e., maintaining a posture) and dynamic (i.e., changing position and moving through the environment) activities (Sílvia L. Pavão et al. 2014).

In children, functional balance is defined as the ability to maintain the centre of mass within the base of support during childhood activities of daily living, social activities and recreational activities at home, school and in the community (Franjoine et al. 2010). Impaired postural control and balance have a negative effect on gross motor function (Sílvia Leticia Pavão, Barbosa, et al. 2014; Kwon et Ahn 2016), ambulatory capacity (L. Wallard 2014;

Rethwilm et al. 2021; Ertürk et al. 2021), risk of falls (Alemdaroğlu et al. 2017; Boyer et Patterson 2018), and participation in ADL (Sílvia L. Pavão et al. 2014; Krishnaprasad, Narayan, et Kumar 2022).

Spasticity, defined as a velocity-dependent increase in the tonic stretch reflex (Lance 1980), is one element of the upper motor neuron syndrome that could affect balance ability. Although studies have demonstrated that spasticity has a significant negative impact on spatiotemporal gait parameters and lower limb (LL) kinematics in children and adolescents with spastic CP (Papageorgiou, Simon-Martinez, et al. 2019; Multani et al. 2019; Bowal et al. 2021), the impact of LL muscle spasticity on balance is not fully understood. It is often assumed that spasticity reduces postural control in CP because it limits normal equilibration reflexes and functions, however few studies have attempted to verify this. In adults with stroke, a few studies, that evaluated the relationship between spasticity and centre of pressure displacement in quiet standing, found poorer postural control in individuals with higher levels of spasticity (Phadke et al. 2014; Singer, Nishihara, et Mochizuki 2016; Rahimzadeh Khiabani et al. 2017). However, some other studies in the same population did not find any relationship between spasticity and sway variables (Mahmoudzadeh et al. 2021; Amatya et al. 2019). In children with CP, one study found that selective dorsal rhizotomy improved variables related to the postural control (path velocity, radial displacement and frequency of the sway)(Rumberg et al. 2016) but, to our knowledge, no study has investigated

the potential impact of spasticity on the functional balance of children with CP.

In children with CP, impaired balance negatively impacts the performance of daily activities and limits participation at home, at school, and community life. It is important to determine if spasticity negatively impacts functional balance because this could influence treatment decisions.

Therefore, the primary aim of this study was to investigate the relationship between LL spasticity (evaluated using the Modified Ashworth Scale) and functional balance skills (measured using the Pediatric Balance Scale) in ambulant children with spastic CP. The secondary aim was to determine if spasticity of the LL muscles, particularly the periarticular muscles of the knee and ankle, was correlated with the static and dynamic sub-scores of the PBS. The third objective was to determine if spasticity of the LL muscles, particularly the periarticular muscles of the knee and ankle, was correlated with specific items of the PBS. We hypothesised that spasticity would have a negative influence on functional balance capacity. We also hypothesised that LL spasticity would differently affect the PBS sub-scores and the scores for each of the 14 items.

## 2. Material and methods

### 2.1. Design

We conducted an observational, cross-sectional study from January 2018 to December 2019. The protocol received ethical approval from the CPP Ile-De-France V, Ref CPP 16188, N°ID-RCB 2016-A01776-45. The study was conducted in the Movement Analysis Department (UFAM) of the *Hôpitaux de Saint-Maurice (94, France)*. Medical doctors from the physical medicine and rehabilitation department identified potentially eligible participants and informed their parents of the study. Parents or guardians provided written, informed consent for their child's participation and the children assented to participate. The study is reported according to the STROBE guidelines.

### 2.2. Participants

The inclusion criteria were children aged 5 to 12 years, with a diagnosis of spastic CP,

GMFCS level I (mild CP) II or III (moderate CP), and sufficient cognitive function to follow the instructions for the PBS. We did not include children with dyskinetic or ataxic CP, uncorrected visual or hearing impairment, or vestibular dysfunction, children who had undergone neurosurgical or orthopaedic surgery in the last 1 year, botulinum toxin injection or serial casting during the previous 6 months, or children who had uncontrolled seizures or severe concurrent illness or disease not typically associated with CP.

### 2.3. Spasticity and balance assessment

The same experienced paediatric physiotherapist assessed spasticity and balance in all children.

#### *Modified Ashworth Scale*

Lower limbs spasticity was evaluated using the 5-point Modified Ashworth Scale (MAS). Spasticity is rated according to the degree of resistance during passive movement through the available range of motion (R. W. Bohannon et Smith 1987). Despite its limitations (R. W. Bohannon et Smith 1987; Meseguer-Henarejos et al. 2018; Yam et Leung 2006), the MAS is the most frequently used scale for the clinical evaluation of spasticity in children with CP (Fosdahl et al. 2020; Yoo 2022; Hägglund et al. 2021; Lindén et al. 2019). Each participant was assessed lying supine on a plinth in a relaxed position. The head was maintained in neutral to avoid eliciting the tonic neck reflex. Both LLs were evaluated in the case of bilateral CP as well as unilateral CP because spasticity may also be found in the 'unaffected' limb. The muscles tested were Rectus Femoris, Hamstrings, Soleus and Gastrocnemius. These multi-joint muscles were chosen because they are the most commonly spastic in CP. A MAS total score was calculated by summing the scores for each muscle for both limbs (cf. Appendix). For statistical purposes, MAS ratings were transformed from a 0 to 4 scale, including a 1+ data point, to ratings of 0 to 5.

#### *Pediatric Balance Scale*

The Pediatric Balance Scale (PBS) was used to assess static and dynamic balance abilities, ranging from standing up from a sitting position to standing on one foot (Appendix). Each of the 14 PBS items is rated from 0 to 4 and the scoring criteria include both qualitative

and quantitative measures. Item scores are summed to obtain a total PBS score (maximum 56 points) (Franjoine, Gunther, et Taylor 2003). The PBS has good test-retest and interrater reliability when used in school age children with mild to moderate motor impairments (G.-W. Kim et Ko 2010; Darr et al. 2015; Chen 2013). PBS scores correlate with the performance of functional tasks, including daily living activities (Duarte 2014; Silvia Leticia Pavão, Barbosa, et al. 2014; Kwon et Ahn 2016). The total PBS score can be divided into

sub-scores: static PBS (items 4-9) and dynamic PBS (items 1-3 and 10-14), as shown in Table 1.

#### GMFCS

Gross motor function was evaluated using the GMFCS. The GMFCS classifies the child's postural and ambulatory capacity into 5 categories (R. Palisano et al. 1997; R. Palisano 2008). GMFCS level was classified by either a physiatrist or a physiotherapist following a parent interview and clinical evaluations.

Table 1. Classification of PBS items between Static PBS and Dynamic PBS

	Items	Score
Static PBS	4. Standing unsupported	.../24
	5. Sitting unsupported	
	6. Standing with eyes closed	
	7. Standing with feet together	
	8. Standing with one foot in front	
9. Standing on one foot	.../32	
Dynamic PBS		1. Sitting to standing
		2. Standing to sitting
		3. Transfers
		10. Turning 360 degrees
		11. Turning to look behind
		12. Retrieving object from floor
		13. Placing alternate foot on stool
	14. Reaching forward with outstretched arm	
<b>Total PBS = Static PBS + Dynamic PBS</b>		<b>.../56</b>

#### 2.4. Statistical analysis

The statistical analysis was conducted using JASP software (version 0.17.1, <https://jasp-stats.org/>). Descriptive statistics were applied to summarize the participant characteristics, the clinical examination variables and the primary outcomes for spasticity and PBS score. The normality of the data distribution was assessed using the Kolmogorov-Smirnov test. As many of the variables did not have a normal distribution, non-parametric statistics were used. Therefore,

the relationship between Sum MAS scores – for LL, knees, and ankles – and the PBS total or sub-scores were analysed using the Spearman correlation coefficient (Spearman's rho). The significance threshold was set at  $p < 0.05$ .

### 3. Results

#### 3.1. Participant Characteristics

In total, 42 children (19 girls, 23 boys) with spastic CP were included. Mean age was 8.9 (2.1) years, range (5.1-12.0) years; mean height was 1.32 m, range (0.94-1.53); mean weight

was 30.4 kg, range (15-55). 25 children (60%) had unilateral CP and 17 (40%) had bilateral CP; 26 had GMFCS level I, 13 GMFCS level II, and 3 GMFCS level III. LL spasticity ratings

(MAS) and PBS values are presented in Table 2. All the children completed all the assessments, and all data were analysed.

Table 2. Age, height, weight and Lower limbs PBS and MAS for the whole sample and regarding GMFCS level and CP topography

	Whole sample n=42	GMFCS level		CP topography		
		Mild GMFCS I n=26	Moderate GMFCS II-III n=16	Unilateral n=25	Bilateral n=17	
Age (years)	8.9 (5.1-12.0)	8.7 (5.1-12.0)	9.1 (5.4 - 12.0)	8.7 (5.4- 12.0)	9.0 (5.1- 12.0)	
Height (m)	1.32 (0.94-1.53)	1.32 (1.12- 1.53)	1.32 (0.94-1.53)	1.31 (0.94-1.53)	1.33 (1.11-1.53)	
Weight (kg)	30.4 (15-55)	30.2 (15-55)	30.9 (15- 49)	29.5 (15- 55)	31.8 (15- 49)	
PBS	PBS (../56)	50.1 (35-56)	52.7 (48-56)	46.1 (35- 55)	51.9 (42- 56)	47.7 (35- 55)
	Static PBS (../24)	21.1 (15-24)	22.3 (18-24)	19.2 (15- 24)	22.1 (16- 24)	19.7 (15- 23)
	Dynamic PBS (../32)	29.1 (19-32)	30.4 (28-32)	26.9 (19- 31)	29.8 (26- 32)	28.0 (19- 32)
MAS	Sum MAS LL (../32)	5.9 (0- 17)	4.8 (0-12)	7.8 (3-17)	4.2 (0-10)	8.2 (3- 17)
	Sum MAS knees (../16)	1.9 (0- 7)	1.1 (0-4)	3.2 (1-7)	1.4 (0-6)	2.5 (0-7)
	Sum MAS ankles (../16)	4.0 (0- 10)	3.7 (0-8)	4.6 (1-10)	2.8 (0-9)	5.7 (1- 10)

LL: lower limbs; MAS: modified Ashworth scale; PBS: paediatric balance scale; GMFCS: gross motor function classification system; CP: cerebral palsy

### 3.2. Relationship between spasticity and functional balance capacity

The correlations between LL spasticity scores and functional balance capacity are summarized in Table 3. A significant moderate negative correlation was found between Sum MAS LL score and PBS total score, and between Sum MAS LL score and PBS static score. A significant but weak negative correlation was found between Sum MAS LL score and PBS dynamic score.

Sum MAS knees score was weakly, negatively correlated with dynamic PBS score. Sum MAS ankles score was weakly, negatively correlated with PBS score and static PBS score.

Sum MAS LL was significantly moderately negatively correlated with PBS items 7,8,9 and 13, and weakly negatively correlated with PBS item 14. Sum MAS knees was significantly moderately negatively correlated with PBS item 14, and significantly weakly negatively correlated with items 2,3,7,12 and 13. Sum MAS ankles was significantly moderately negatively correlated with PBS item



9, and significantly weakly negatively correlated with item 8.

Table 3. Correlations between sum MAS scores and PBS scores for the whole sample (n=42)

	r and p-values		
	Sum MAS LL	Sum MAS knees	Sum MAS ankles
<b>PBS</b>	-		
Items 1-14	0.43**	-0.27	-0.33*
<b>Static PBS</b>	-		
Items 4-9	0.48**	-0.26	-0.37*
<b>Dynamic PBS</b>			
Items 1-3, 10-14	-0.31*	-0.33*	-0.20
Item 1	-0.12	-0.25	-0.10
Item 2	-0.24	-0.34*	-0.18
Item 3	-0.25	-0.35*	-0.19
Item 4	N/A	N/A	N/A
Item 5	N/A	N/A	N/A
Item 6	-0.10	-0.06	-0.06
Item 7	0.43**	-0.34*	-0.30
Item 8	0.47**	-0.30	-0.37*
Item 9	0.52**	-0.23	-0.41**
Item 10	-0.10	-0.27	-0.08
Item 11	-0.18	-0.19	-0.13
Item 12	-0.22	-0.32*	-0.17
Item 13	0.44**	-0.35*	-0.29
Item 14	-0.39*	-0.40**	-0.23
MAS: Modified Ashworth Scale; LL: lower limbs; PBS: paediatric balance scale; GMFCS: gross motor function classification system.			
N/A not applicable because scores were identical for all participants.			
*p<0.05; **p<0.01			
Moderate correlation 0,4 ≤ r < 0,6			
Weak correlation 0,2 ≤ r < 0,4			
Very Weak correlation r < 0,2			

## 4. Discussion

### 4.1. Summary of findings

The results of this study showed that, as hypothesised, spasticity negatively influenced functional balance capacity in children with unilateral and bilateral CP. Furthermore, spasticity correlated differently with the different sub-scores (static and dynamic) and items of the PBS. Spasticity of the triceps sural muscles was negatively correlated with static PBS items, whereas spasticity of the knee flexor and extensor muscles was negatively correlated with dynamic PBS items. Finally, the lower limb spasticity scores for the triceps sural and knee flexors and extensors correlated with different items of the PBS.

### 4.2. Relationship between lower limb spasticity and functional balance capacity

We were unable to compare our results with those of similar studies because in our knowledge no other studies have evaluated the relationship between spasticity and functional balance capacity in children with CP. A study of international adult male footballers with CP found a negative correlation between hip adductor spasticity and dynamic balance capacity (tandem walk), but no correlation with knee or ankle muscle spasticity (Roldan et al. 2021). Although more studies of this relationship have been performed in adults with stroke, the relationship between spasticity and balance remains unclear. Several studies found poorer postural control (postural sway assessment) in individuals with higher levels of spasticity (Phadke et al. 2014; Singer, Nishihara, et Mochizuki 2016; Rahimzadeh Khiabani et al. 2017). However, another study in adults with stroke found no relationship between the degree of ankle plantar flexor spasticity and functional measure of balance (timed up and go test) or posturographic variables (Mahmoudzadeh et al. 2021). Moreover, a study of the effect of botulinum toxin injection in the upper and lower limb muscles found no change in centre of pressure based variables post injection (Amatya et al. 2019). The disparity between these results suggests that the impact of spasticity on functional balance capacity may depend on many factors, such as the pathology (e.g., CP or stroke), the individual's age (i.e., still growing

and developing or aging), and the presence of other impairments (e.g., dystonia or secondary musculoskeletal disorders). However, more robust studies are required before conclusions can be drawn.

The relationship we found between LL spasticity and functional balance capacity has a strong theoretical basis. Indeed in normal physiological conditions, the myotatic reflex participates in maintaining an erect posture against gravity by limiting muscle lengthening and thus maintaining the centre of pressure within the base of support (Lloyd 1950). Spasticity increases the hyperexcitability of the myotatic reflex, and alters muscle tone regulation, balance control and movement (Ivanenko et Gurfinkel 2018b; L. Bar-On 2014). In the case of spastic CP, all these mechanisms may be impaired. Indeed, in adults with pure hereditary spastic paraparesis, of which the main symptom is spasticity with little loss of muscle strength, increased short latency reflexes were found to contribute to the loss of postural stability and balance recovery (De Niet et al. 2013).

The weak to moderate relationship between LL spasticity and PBS scores suggests that factors other than spasticity are also involved in the loss of functional balance capacity in children with CP. Although studies of motor function in children with CP have found negative correlations with spasticity (Goh et al. 2006), it is not the only cause of poor gross motor function in this group (H. K. Graham et al. 2016). Selective motor control (Noble, Gough, et Shortland 2019) and muscle strength (H. K. Graham et al. 2016; H. S. Kim, Steinbok, et Wickenheiser 2006) may account more for disability than spasticity in determining gross motor function in children with CP. The results of several studies suggest that selective motor control and strength also play an important role in functional balance capacity. One study found that selective motor control was strongly correlated with PBS score in 36 children with bilateral CP (GMFCS level I to II) (Yun et al. 2022). Recently, another study showed a positive relationship between strength and balance ability in ambulant children and adolescents with CP (Afnan et al. 2023), and a study involving a strength training program found positive functional and activity effects on

balance in children and adolescents with cerebral palsy and GMFCS levels I, II, and III (Merino-Andrés et al. 2022). In children with CP and spasticity as the predominant motor feature, coexisting dystonia is often disregarded (Suresh et al. 2022; P. Kumar et Sankhyan 2022). The severity of dystonia in CP is negatively correlated with functional status (Vanmechelen et al. 2020), but the specific impact on postural balance have to be more investigated.

#### 4.3. Relationship between ankle and knee muscle spasticity and static, dynamic and individual PBS items

Studies in healthy individuals have demonstrated that different strategies, or postural coordinations, are used to ensure balance in the anterior-posterior plane depending on intrinsic constraints (height, weight, training, etc.), environmental constraints (gravity, the properties of the supporting surface, etc.) and the complexity of the task (Lewis M. Nashner et McCollum 1985; F. B. Horak et Nashner 1986; B. G. Bardy et al. 1999). The ankle strategy, or in-phase coordination (ankle and hip joints move in the same direction simultaneously), is used during "easy" postural tasks or to counteract minor perturbations during normal stance or in unperturbed condition (Lewis M. Nashner et McCollum 1985; Runge et al. 1999; Ávila de Oliveira et al. 2022). In contrast, for more complex tasks, such as without vision, altered ground surfaces or sudden postural changes, a more global, multi-segment strategy is used; the hip strategy or anti-phase coordination (ankle and hip joints move in the opposite direction simultaneously) (Lewis M. Nashner et McCollum 1985; F. B. Horak et Nashner 1986; B. G. Bardy et al. 1999; Runge et al. 1999). Our results are consistent with these observations. We found that triceps sural spasticity was inversely correlated with the scores of the static PBS items, suggesting that spasticity of the ankle plantar flexors reduced the capacity to control static postural positions. This is supported by the correlation between the triceps sural spasticity score and PBS items 8 and 9, which involve static positions with a small base of support. This is also in line with studies in healthy subjects showing that the ankle muscles play a central role in maintaining balance during single and bilateral limb stance (Boyas, Hajj, et

Bilodeau 2013; Rojhani-Shirazi, Amiri, et Ebrahimi 2019; Hirono et al. 2020). Finally, in both typically developing children and children with spastic CP, items 8 and 9 of the PBS are the most difficult (Franjoine et al. 2010; Darr et al. 2015; Franjoine et al. 2022). These items require a higher level of neuro-motor maturity than the other items (65) because they require the child to maintain balance with a narrow base of support.

Knee flexor and extensor muscle spasticity was inversely correlated with the scores of the dynamic PBS items and with PBS items 2, 3, 7, 12, 13 and 14 (Standing to sitting, Transfers, Standing with feet together, Retrieving object from floor, Placing alternate foot on stool, Reaching forward with outstretched arm). These items represent complex motor actions that require coordinated movement of the trunk, thighs and lower legs. We could hypothesize that multi-joint hamstring and rectus femoris muscles that have actions on both the hips and knees are specifically implicated in those types of multi-segmental motor tasks.

#### 4.4. Study limitations

This study has several limitations. First, although much larger than many studies in this domain, the sample size was relatively small, which limits the external validity of the results. Future studies should include larger samples and aim to determine if the impact of spasticity on PBS score varies between unilateral/bilateral and mild CP/moderate CP subgroups.

The rating of spasticity using the MAS relies on the examiner's experience (Meseguer-Henarejos et al. 2018). The same researcher performed all the ratings to remove issues relating to inter-rater reliability.

We did not thoroughly investigate the presence of comorbidities, such as intellectual disabilities or attention deficit disorders, that could potentially impact comprehension of the task, concentration, and thus the individual's balance capacity.

#### 4.5. Clinical implications and perspectives

The results of this study have several implications for clinical practice. The moderate relationship between spasticity and functional balance capacity in children with CP suggests

that spasticity-reducing treatments (e.g., pharmacological agents or neuro-surgery) may have a positive impact on functional balance; however, specific treatment trials are required to verify this. In clinical practice, the decision to treat spasticity is often based on the results of clinical assessments, such as joint range of motion and muscle length, or an assessment of the gait pattern. The results we present can help clinicians to include an assessment of functional balance in their decision making process, as recommended by the International Classification of Functioning, disability and health: children and youth version (World Health Organization 2007).

Although spasticity is considered to be a limiting factor of gross motor function, it is believed that in some children with CP, LL extensor muscle spasticity is necessary to maintain an erect anti-gravity position (Goh et al. 2006; Giuliani 1991; Damiano et al. 2002). This phenomenon has also been described for other conditions involving an upper motor neuron syndrome, such as adults post-stroke (Phadke et al. 2014; Rahimzadeh Khiabani et al. 2017; Ward 2008; Rekand 2010; Rivelis, Zafar, et Morice 2022). Our results do not support this since we found a negative correlation between LL muscle spasticity and functional balance capacity. However, we included children with mild levels of disability (GMFCS I and II); only a small proportion of the sample had a GMFCS level of III. The effect of spasticity on functional balance capacity, and particularly the capacity to remain in upright standing may be different in children with GMFCS levels III and IV. In those children, spasticity might compensate for underlying weakness of the

extensor muscle chain. Further studies are required to check this hypothesis.

#### **Funding sources**

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

#### **Data availability statement**

The datasets generated for this study are available on request to the corresponding author. The raw data supporting the conclusions of this manuscript will be made available by the authors, without undue reservation, to any qualified researcher.

#### **Declaration of competing interest**

None of the authors have any conflict of interest to disclose.

#### **Acknowledgements**

The authors wish to thank Dr Francisca Meurin and Dr Michel Thétio for their support with data collection, Florian Leclère for his invaluable help with data processing and critical review of the article, and Johanna Robertson for writing and language assistance. The authors also warmly thank the children and their parents for their participation and enthusiasm.

## References

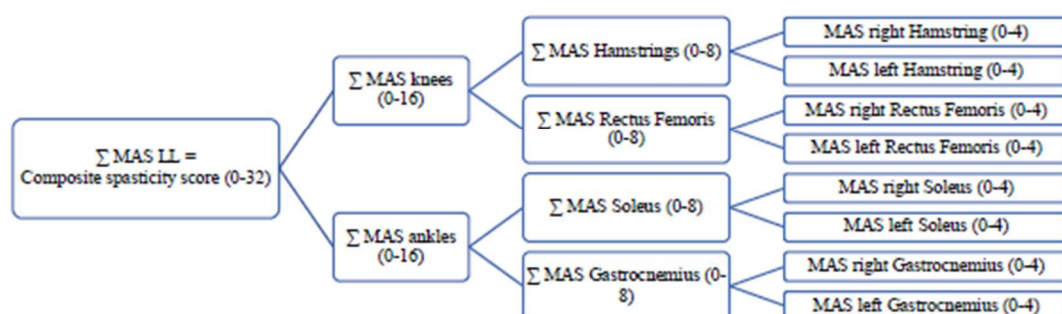
1. Rosenbaum P, Paneth N, Leviton A, Goldstein M, Bax M, Damiano D, et al. A report: the definition and classification of cerebral palsy April 2006. *Dev Med Child Neurol Suppl.* févr 2007;109:8-14.
2. Graham HK, Rosenbaum P, Paneth N, Dan B, Lin JP, Damiano DL, et al. Cerebral palsy. *Nat Rev Dis Primer.* 07 2016;2:15082.
3. Arnaud C, Ehlinger V, Delobel-Ayoub M, Klapouszczak D, Perra O, Hensey O, et al. Trends in Prevalence and Severity of Pre/Perinatal Cerebral Palsy Among Children Born Preterm From 2004 to 2010: A SCPE Collaboration Study. *Front Neurol.* 2021;12:624884.
4. <https://cerebralpalsy.org.au/>.
5. Patel DR, Neelakantan M, Pandher K, Merrick J. Cerebral palsy in children: a clinical overview. *Transl Pediatr.* févr 2020;9(Suppl 1):S125-35.
6. Vitrikas K, Dalton H, Breish D. Cerebral Palsy: An Overview. *Am Fam Physician.* 15 févr 2020;101(4):213-20.
7. Pavão SL, Rocha NACF. Sensory processing disorders in children with cerebral palsy. *Infant Behav Dev.* févr 2017;46:1-6.
8. Graham HK, Thomason P, Willoughby K, Hastings-Ison T, Stralen RV, Dala-Ali B, et al. Musculoskeletal pathology in cerebral palsy: A classification system and reliability study. *Children.* 2021;8(3):252.
9. Pavão SL, Nunes GS, Santos AN, Rocha NACF. Relationship between static postural control and the level of functional abilities in children with cerebral palsy. *Braz J Phys Ther.* août 2014;18(4):300-7.
10. Franjoine MR, Darr N, Held SL, Kott K, Young BL. The performance of children developing typically on the pediatric balance scale. *Pediatr Phys Ther Off Publ Sect Pediatr Am Phys Ther Assoc.* 2010;22(4):350-9.
11. Pavão SL, Barbosa KAF, Sato T de O, Rocha NACF. Functional balance and gross motor function in children with cerebral palsy. *Res Dev Disabil.* oct 2014;35(10):2278-83.
12. Kwon HY, Ahn SY. Correlation between the gross motor performance measurement and pediatric balance scale with respect to movement disorder in children with cerebral palsy. *J Phys Ther Sci.* août 2016;28(8):2279-83.
13. Wallard L. Balance control in gait children with cerebral palsy. *Gait Posture.* 2014;40(1):43-7.
14. Rethwilm R, Böhm H, Haase M, Perchthaler D, Dussa CU, Federolf P. Dynamic stability in cerebral palsy during walking and running: Predictors and regulation strategies. *Gait Posture [Internet].* 1 févr 2021 [cité 21 mai 2021];84:329-34. Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966636220306986>
15. Ertürk G, Akalan NE, Evrendilek H, Karaca G, Bilgili F. The Relationship of One Leg Standing Duration to GMFM Scores and to Stance Phase of Walking in Children with Hemiplegic Cerebral Palsy. *Physiother Theory Pract.* 7 mai 2021;1-5.
16. Alemdaroğlu E, Özbudak SD, Mandiroğlu S, Biçer SA, Özgirgin N, Uçan H. Predictive Factors for Inpatient Falls among Children with Cerebral Palsy. *J Pediatr Nurs.* févr 2017;32:25-31.
17. Boyer ER, Patterson A. Gait pathology subtypes are not associated with self-reported fall frequency in children with cerebral palsy. *Gait Posture.* 2018;63:189-94.
18. Krishnaprasad KM, Narayan A, Kumar KV. Association between Postural Stability and Functional Abilities in Children with Spastic Cerebral Palsy. *Crit Rev Phys Rehabil Med.* 2022;34(2).
19. Lance JW. The control of muscle tone, reflexes, and movement: Robert Wartenberg Lecture. *Neurology.* déc 1980;30(12):1303-13.
20. Papageorgiou E, Simon-Martinez C, Molenaers G, Ortibus E, Van Campenhout A, Desloovere K. Are spasticity, weakness, selectivity, and passive range of motion related to gait deviations in children with spastic cerebral palsy? A statistical parametric mapping study. *PLoS One.* 2019;14(10):e0223363.
21. Multani I, Manji J, Hastings-Ison T, Khot A, Graham K. Botulinum Toxin in the Management of Children with Cerebral Palsy. *Paediatr Drugs.* 2019;21(4):261-81.
22. Bowal N, Nettel-Aguirre A, Ursulak G, Condliffe E, Robu I, Goldstein S, et al. Associations of hamstring and triceps surae muscle spasticity and stance phase gait kinematics in children with spastic diplegic cerebral palsy. *J Biomech.* 5 mars 2021;117:110218.

23. Phadke CP, Ismail F, Boulias C, Gage W, Mochizuki G. The impact of post-stroke spasticity and botulinum toxin on standing balance: a systematic review. *Expert Rev Neurother*. mars 2014;14(3):319-27.
24. Singer JC, Nishihara K, Mochizuki G. Does Poststroke Lower-Limb Spasticity Influence the Recovery of Standing Balance Control? A 2-Year Multilevel Growth Model. *Neurorehabil Neural Repair*. 2016;30(7):626-34.
25. Rahimzadeh Khiabani R, Mochizuki G, Ismail F, Boulias C, Phadke CP, Gage WH. Impact of Spasticity on Balance Control during Quiet Standing in Persons after Stroke. *Stroke Res Treat* [Internet]. 14 sept 2017 [cité 1 juill 2022];2017:e6153714. Disponible sur: <https://www.hindawi.com/journals/srt/2017/6153714/>
26. Mahmoudzadeh A, Nakhostin Ansari N, Naghdi S, Ghasemi E, Motamedzadeh O, Shaw BS, et al. Role of Spasticity Severity in the Balance of Post-stroke Patients. *Front Hum Neurosci*. 2021;15:783093.
27. Amatya B, Cofré Lizama LE, Elmalik A, Bastani A, Galea MP, Khan F. Multidimensional evaluation of changes in limb function following botulinum toxin injection in persons with stroke. *NeuroRehabilitation*. 2019;45(1):67-78.
28. Rumberg F, Bakir MS, Taylor WR, Haberl H, Sarpong A, Sharankou I, et al. The Effects of Selective Dorsal Rhizotomy on Balance and Symmetry of Gait in Children with Cerebral Palsy. *PLoS ONE* [Internet]. 4 avr 2016 [cité 11 avr 2023];11(4):e0152930. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4820221/>
29. Bohannon RW, Smith MB. Interrater reliability of a modified Ashworth scale of muscle spasticity. *Phys Ther*. févr 1987;67(2):206-7.
30. Meseguer-Henarejos AB, Sánchez-Meca J, López-Pina JA, Carles-Hernández R. Inter- and intra-rater reliability of the Modified Ashworth Scale: a systematic review and meta-analysis. *Eur J Phys Rehabil Med*. août 2018;54(4):576-90.
31. Yam WKL, Leung MSM. Interrater reliability of Modified Ashworth Scale and Modified Tardieu Scale in children with spastic cerebral palsy. *J Child Neurol*. déc 2006;21(12):1031-5.
32. Fosdahl MA, Jahnsen R, Pripp AH, Holm I. Change in popliteal angle and hamstrings spasticity during childhood in ambulant children with spastic bilateral cerebral palsy. A register-based cohort study. *BMC Pediatr* [Internet]. déc 2020 [cité 17 juin 2022];20(1):11. Disponible sur: <https://bmcpediatr.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12887-019-1891-y>
33. Yoo. Reliability of the Modified Ashworth and Modified Tardieu Scales with Standardized Movement Speeds in Children with Spastic Cerebral Palsy. 2022 [cité 1 juill 2022]; Disponible sur: <https://www.mdpi.com/2227-9067/9/6/827>
34. Hägglund G, Hollung SJ, Ahonen M, Andersen GL, Eggertsdóttir G, Gaston MS, et al. Treatment of spasticity in children and adolescents with cerebral palsy in Northern Europe: a CP-North registry study. *BMC Neurol*. 12 juill 2021;21(1):276.
35. Lindén O, Hägglund G, Rodby-Bousquet E, Wagner P. The development of spasticity with age in 4,162 children with cerebral palsy: a register-based prospective cohort study. *Acta Orthop* [Internet]. 4 mai 2019 [cité 1 juill 2022];90(3):286-91. Disponible sur: <https://actaorthop.org/actao/article/view/519>
36. Franjoine MR, Gunther JS, Taylor MJ. Pediatric Balance Scale: A Modified Version of the Berg Balance Scale for the School-Age Child with Mild to Moderate Motor Impairment: *Pediatr Phys Ther* [Internet]. 2003 [cité 9 août 2017];15(2):114-28. Disponible sur: <http://content.wkhealth.com/linkback/openurl?sid=WKPTLP:landingpage&an=00001577-200315020-00006>
37. Kim GW, Ko JY. The reliability of a pediatric balance scale based on the raters' clinical work experience and test experience. *J Korean Phys Ther*. 2010;22(6):35-42.
38. Darr N, Franjoine MR, Campbell SK, Smith E. Psychometric Properties of the Pediatric Balance Scale Using Rasch Analysis. *Pediatr Phys Ther Off Publ Sect Pediatr Am Phys Ther Assoc*. 2015;27(4):337-48.
39. Chen C ling. Validity, responsiveness, minimal detectable change, and minimal clinically important change of Pediatric Balance Scale in children with cerebral palsy. *Res Dev Disabil* [Internet]. 2013;34(3):916-22. Disponible sur: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0891422212002752>

40. Duarte N. Correlation between Pediatric Balance Scale and Functional Test in Children with Cerebral Palsy. *J Phys Ther Sci*. 2014;(26):849-53.
41. Palisano R, Rosenbaum P, Walter S, Russell D, Wood E, Galuppi B. Gross motor function classification system for cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol*. 1997;39(4):214-23.
42. Palisano R. Content validity of the expanded and revised Gross Motor Function Classification System - Palisano - 2008 - *Developmental Medicine & Child Neurology* - Wiley Online Library. 2008 [cité 3 juin 2022]; Disponible sur: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1469-8749.2008.03089.x>
43. Roldan A, Henríquez M, Iturricastillo A, Castillo D, Yanci J, Reina R. To What Degree Does Limb Spasticity Affect Motor Performance in Para-Footballers With Cerebral Palsy? *Front Physiol*. 2021;12:807853.
44. Lloyd. Principles of spinal reflex activity. In: *A textbook of physiology* [Internet]. Fulton J.F. (ed.), WB Saunders Company, Philadelphia&London,. 1950 [cité 23 janv 2023]. Disponible sur: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/4413606/>
45. Ivanenko Y, Gurfinkel VS. Human Postural Control. *Front Neurosci* [Internet]. 2018 [cité 9 janv 2023];12. Disponible sur: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnins.2018.00171>
46. Bar-On L. Muscle Activation Patterns When Passively Stretching Spastic Lower Limb Muscles of Children with Cerebral Palsy. *PLoS ONE* [Internet]. 2014;9(3):e91759. Disponible sur: <http://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0091759>
47. De Niet M, Weerdesteyn V, de Bot ST, van de Warrenburg BPC, Geurts AC. Does calf muscle spasticity contribute to postural imbalance? A study in persons with pure hereditary spastic paraparesis. *Gait Posture*. juin 2013;38(2):304-9.
48. Goh HT, Thompson M, Huang WB, Schafer S. Relationships among measures of knee musculoskeletal impairments, gross motor function, and walking efficiency in children with cerebral palsy. *Pediatr Phys Ther Off Publ Sect Pediatr Am Phys Ther Assoc*. 2006;18(4):253-61.
49. Noble JJ, Gough M, Shortland AP. Selective motor control and gross motor function in bilateral spastic cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol*. janv 2019;61(1):57-61.
50. Kim HS, Steinbok P, Wickenheiser D. Predictors of poor outcome after selective dorsal rhizotomy in treatment of spastic cerebral palsy. *Childs Nerv Syst ChNS Off J Int Soc Pediatr Neurosurg*. janv 2006;22(1):60-6.
51. Yun G, Huang M, Cao J, Hu X. Selective motor control correlates with gross motor ability, functional balance and gait performance in ambulant children with bilateral spastic cerebral palsy. *Gait Posture*. 19 oct 2022;99:9-13.
52. Afnan Z, Malik AN, Jahan S, Ali A. Association of muscles length and strength with balance and functional status among children with diplegic spastic cerebral palsy. *J PMA J Pak Med Assoc*. févr 2023;73(2):253-7.
53. Merino-Andrés, A G de ML, Di D, A SS. Effect of muscle strength training in children and adolescents with spastic cerebral palsy: A systematic review and meta-analysis. *Clin Rehabil* [Internet]. janv 2022 [cité 26 juin 2022];36(1). Disponible sur: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34407619/>
54. Suresh N, Garg D, Pandey S, Malhotra RK, Majumdar R, Mukherjee SB, et al. Spectrum of Movement Disorders and Correlation with Functional Status in Children with Cerebral Palsy. *Indian J Pediatr* [Internet]. 1 avr 2022 [cité 25 févr 2023];89(4):333-8. Disponible sur: <https://doi.org/10.1007/s12098-021-03785-7>
55. Kumar P, Sankhyan N. Cerebral Palsy—More Than Just Spasticity. *Indian J Pediatr* [Internet]. avr 2022 [cité 17 juin 2022];89(4):321-2. Disponible sur: <https://link.springer.com/10.1007/s12098-021-04072-1>
56. Vanmechelen I, Bektashi S, Bossier K, Feys H, Deklerck J, Monbaliu E. Presence and severity of dystonia and choreoathetosis overflow movements in participants with dyskinetic cerebral palsy and their relation with functional classification scales. *Disabil Rehabil*. juin 2020;42(11):1548-55.
57. Nashner LM, McCollum G. The organization of human postural movements: A formal basis and experimental synthesis. *Behav Brain Sci*. 1985;8(1):135-72.
58. Horak FB, Nashner LM. Central programming of postural movements: adaptation to altered support-surface configurations. *J Neurophysiol*. juin 1986;55(6):1369-81.

59. Bardy BG, Marin L, Stoffregen TA, Bootsma RJ. Postural coordination modes considered as emergent phenomena. *J Exp Psychol Hum Percept Perform.* oct 1999;25(5):1284-301.
60. Runge CF, Shupert CL, Horak FB, Zajac FE. Ankle and hip postural strategies defined by joint torques. *Gait Posture.* 1999;10(2):161-70.
61. Ávila de Oliveira J, Azzi NM, Coelho DB, Teixeira LA. Differential activation of the plantar flexor muscles in balance control across different feet orientations on the ground. *J Electromyogr Kinesiol Off J Int Soc Electrophysiol Kinesiol.* févr 2022;62:102625.
62. Boyas S, Hajj M, Bilodeau M. Influence of ankle plantarflexor fatigue on postural sway, lower limb articular angles, and postural strategies during unipedal quiet standing. *Gait Posture.* avr 2013;37(4):547-51.
63. Rojhani-Shirazi Z, Amiri Z, Ebrahimi S. Effects of Plantar Flexor Muscles Fatigue on Postural Control during Quiet Stance and External Perturbation in Healthy Subjects. *J Biomed Phys Eng.* avr 2019;9(2):233-42.
64. Hirono T, Ikezoe T, Taniguchi M, Yamagata M, Miyakoshi K, Umehara J, et al. Relationship between ankle plantar flexor force steadiness and postural stability on stable and unstable platforms. *Eur J Appl Physiol.* mai 2020;120(5):1075-82.
65. Franjoine MR, Darr N, Young B, McCoy SW, LaForme Fiss A. Examination of the effects of age, sex, and motor ability level on balance capabilities in children with cerebral palsy GMFCS levels I, II, III and typical development using the Pediatric Balance Scale. *Dev Neurorehabilitation.* 2022;25(2):115-24.
66. Lim H. Correlation between the selective control assessment of lower extremity and pediatric balance scale scores in children with spastic cerebral palsy. *J Phys Ther Sci.* déc 2015;27(12):3645-9.
67. World Health Organization. 2007 [cité 18 déc 2022];322. Disponible sur: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/43737>
68. Giuliani CA. Dorsal rhizotomy for children with cerebral palsy: support for concepts of motor control. *Phys Ther.* mars 1991;71(3):248-59.
69. Damiano DL, Quinlivan JM, Owen BF, Payne P, Nelson KC, Abel MF. What does the Ashworth scale really measure and are instrumented measures more valid and precise? *Dev Med Child Neurol.* févr 2002;44(2):112-8.
70. Ward AB. Spasticity treatment with botulinum toxins. *J Neural Transm [Internet].* avr 2008 [cité 12 nov 2022];115(4):607-16. Disponible sur: <http://link.springer.com/10.1007/s00702-007-0833-2>
71. Rekand T. Clinical assessment and management of spasticity: a review. *Acta Neurol Scand Suppl.* 2010;(190):62-6.
72. Rivelis Y, Zafar N, Morice K. Spasticity. In: *StatPearls [Internet].* Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2022 [cité 12 nov 2022]. Disponible sur: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK507869/>

## Appendices



Appendix: Schematic representation of composite spasticity score “Sum MAS lower limbs”



### **3.2 Etude 2 : Les paramètres posturographiques, évalués en conditions quasi-statique et dynamique, sont-ils des déterminants des capacités fonctionnelles d'équilibration d'enfants présentant une Paralysie Cérébrale de type spastique ?**

Cette étude observationnelle transversale porte sur des enfants âgés de 5 à 12 ans avec Paralysie Cérébrale de type spastique, unilatérale ou bilatérale, GMFCS I et II. L'objectif est de décrire les variations des paramètres posturographique et le l'asymétrie de répartition du poids du corps entre les deux membres inférieurs, en fonction des caractéristiques cliniques, sous des conditions sensorielles en condition statique, puis en condition dynamique. De plus, les corrélations entre les variables du CoP en conditions statiques et dynamiques et l'équilibre fonctionnel sont examinées.

Les résultats montrent des corrélations significatives entre certaines variables du CoP et l'équilibre fonctionnel évalué avec la Pediatric Balance Scale. Une évaluation précise de la stabilité posturale et une intervention ciblée sont essentielles pour améliorer les capacités motrices globales et la qualité de vie de cette population. Les recherches futures devraient élargir s'intéresser aux adolescents et adultes avec PC. L'intégration de mesures cinématiques et/ou l'électromyographiques semble primordiale pour identifier les causes des troubles de l'équilibre chez ces enfants.

**L'étude ci-après est en cours de finalisation pour soumission dans une revue internationale à comité de relecture.**

#### **Relationship between static and computerized dynamic posturography and functional balance capacity in children with spastic cerebral palsy**

Audrey Fontaine <sup>a,b</sup>, Raphaël Pionnier <sup>c,1</sup> Arnaud Gouelle <sup>d,1</sup>, Wael Bachta <sup>a</sup>, Philippe Thoumie <sup>a,c</sup>

<sup>a</sup> ISIR, UMR 7222 CNRS, Agathe Group INSERM U 1150, Sorbonne University, Paris, France

<sup>b</sup> "A Pas de Géants", 75013 Paris, France

<sup>c</sup> Unité Fonctionnelle d'Analyse du Mouvement (UFAM), Hôpitaux Nationaux de Saint-Maurice, Saint-Maurice, France.

<sup>d</sup> Université de Reims Champagne-Ardenne, Laboratory Performance, Santé, Métrologie, Société (PSMS), UFR STAPS, 51000 Reims, France

<sup>e</sup> Department of Physical Rehabilitation Medicine, Sorbonne Université, Rothschild hospital AP-HP, Paris, France; Agathe Isir Lab Inserm U1150, Paris, France.

<sup>1</sup> Both authors contributed equally to this work.

Corresponding author: Audrey Fontaine

Cabinet A Pas de Géants, 68 avenue Edison , 75013 Paris , France

[audrey.fontaine.physio@gmail.com](mailto:audrey.fontaine.physio@gmail.com)

## **Abstract**

**Introduction:** Increasing understanding of balance control in children with cerebral palsy (CP) is important to understand and treat functional difficulties.

**Aims:** To describe how CoP variables and weightbearing asymmetry vary with clinical characteristics, sensory conditions and perturbation characteristics, and to investigate correlations between CoP variables in static and dynamic conditions and functional balance (PBS) in children with spastic CP.

**Method:** Observational, cross-sectional study of children with unilateral or bilateral spastic CP aged 5-12 years. The Pediatric Balance Scale was assessed. Static Postural stability was evaluated with eyes open and eyes closed on a firm surface; eyes open on a foam surface. Computerized dynamic posturography was performed with low and high frequency, low and high amplitude perturbations in 5 directions (3 rotations and 2 translations). CoP variables and weightbearing were evaluated using the Matscan® Pressure Measurement system.

**Results:** In total, 35 children with spastic CP participated: mean (SD) age 8.9 (2.1) years, 22 with unilateral and 13 with bilateral CP, 24 with GMFCS level I and 11 with level II. No CoP variables differed between GMFCS level and CP topography in static conditions. With EC, weak significant negative correlations were found between the Dynamic PBS score and the Medio-Lateral (ML) CoP position amplitude, and between the Dynamic PBS score and the 95% confidence ellipse area of the CoP position. The strongest correlations were found in for high frequency-high amplitude perturbations. Sway path ML length, ML and AP amplitude and Lateral (ML) CoP position amplitude, and between the Dynamic PBS score and the 95% confidence ellipse were strongly positively correlated with static PBS scores and weightbearing asymmetry was strongly negatively correlated with dynamic PBS score.

**Discussion:** Gaining a comprehensive understanding of balance control in children with cerebral palsy (CP) is essential for effectively addressing their functional difficulties. Accurate assessment and intervention targeting postural stability are crucial for improving gross motor abilities and quality of life in this population. It is important for future research to broaden the age range and include different types of CP to enhance our knowledge of balance impairments and optimize intervention strategies. The integration of multiple evaluation methods, such as posturography, kinematics, electromyography, and analysis of muscle synergies and balance strategies, is imperative for a comprehensive assessment and the development of tailored rehabilitation programs for children with CP.

**Keywords:** Cerebral palsy; Pediatric balance scale; Static Posturography; Computerized Dynamic Posturography; Asymmetry; Children

## Abbreviations

Amp ML: Medio-Lateral average Sway amplitude, Mean +/- SD (mm)  
Amp AP: Antero-Posterior average Sway amplitude, Mean +/- SD (mm)  
Area: 95% ellipse, Mean +/- SD (mm<sup>2</sup>)  
CP: cerebral palsy  
EC: Eyes Closed  
EO: Eyes Open  
GMFCS: gross motor function classification system  
HFHA: high frequency high amplitude  
HFLA: high frequency low amplitude  
LFHA: low frequency high amplitude  
LFLA: low frequency low amplitude  
Path length, Mean +/- SD (mm)  
PBS: Pediatric balance scale  
RxRyRz: Rotate along x, y, z axis  
TD: typically developing  
TxTy: Translation along x, y axis  
Velocity: Average sway velocity, Mean +/- SD (mm.s-1)

## 1. Introduction

Physiologically, balance is achieved and maintained by complex feedback loops that are controlled by the Central Nervous System. Visual, somato-sensory and vestibular afferents inform the CNS of the relative position of body segments to each other and of the orientation of the body in space. This information is processed by the centres of postural control (spinal cord, brainstem, basal ganglia, vestibular nuclei, reticular formation, posterolateral thalamus, cerebellum and temporoparietal insular cortex) to generate postural motor activity and ensure the maintenance of balance (Sherrington 1907; Nashner and McCollum 1985; Massion 1994; Peterka 2018; Bronstein 2016; Ivanenko and Gurfinkel 2018; MacKinnon 2018; Forbes, Chen, and Blouin 2018).

In spastic cerebral palsy (CP), the brain damage that occurs very early in life alters the function of the afferent sensory organs, particularly the visual, vestibular and proprioceptive systems (Bleyenheuft et Gordon 2013; Silvia Leticia Pavão et Rocha 2017; Silvia Leticia Pavão et al. 2015; Almutairi, Cochrane, et Christy 2019). This perturbs the integration and processing of information within the CNS (Papadelis et al. 2014; Roncesvalles, Woollacott, et Burtner 2002). In addition, the muscle tone and motor control disorders associated with the pyramidal syndrome in CP alter postural reflexes and muscle synergies (Barela et al. 2011; Bigongiari et al. 2011; Girolami, Shiratori, et Aruin 2011).

Finally, secondary musculoskeletal disorders, such as muscle contractures, reduced joint amplitudes, or scoliosis, modify the biomechanical alignment of the lower limbs and the trunk (Domagalska-Szopa et Szopa 2017; Graham et al. 2016).

Balance control is a fundamental skill for carrying out most motor tasks such as transfers, movement and activities of daily living. Many studies have established links between balance skills and gross motor skills (Silvia Leticia Pavão et al. 2014; Silvia L. Pavão et al. 2014), ambulatory capacity (Rethwilm et al. 2021; Katz-Leurer et al. 2009), and autonomy (Krishnaprasad, Narayan, et Kumar 2022). It is therefore essential to be able to describe and quantify balance abilities in research and clinical practice with children with spastic CP (Rosenbaum et Gorter 2012).

Balance function in children with CP is most often assessed using standardised clinical scales. Different scales focus on the assessment of trunk control (Trunk Impairment Scale, Trunk Control Measurement Scale for children), static balance capacity (single leg stance test, The Balance Error Scoring System) dynamic balance capacity (Four square Step Test, Functional Reach Test), and balance during functional tasks (Pediatric Balance Scale, Kids-BESTest, Early Clinical Assessment of Balance, Fullerton Advanced Balance Scale) (Gan et al. 2008; Yi et al. 2012; Saether et al. 2013). Among these scales, the

Pediatric Balance Scale stands out because of its good psychometric qualities and its ease and speed of administration. Furthermore, it examines both static and dynamic balance during tasks that are performed daily (Franjoine, Gunther, et Taylor 2003; Darr et al. 2015; Franjoine et al. 2022). For these reasons, this test is increasingly used in both daily clinical practice and research.

Balance control can also be more precisely evaluated using posturography. Posturography is the most commonly used instrumented assessment to characterise balance function in children with CP. (González et al. 2020; Kingma et al. 2011; Lopes et David 2013; Özal, Aksoy, et Kerem Günel 2022; Silvia Leticia Pavão et al. 2013). Force platforms and other posturographic evaluation instruments provide precise numerical information on the position of the CoP over time. These methods, used with standardised protocols, have very good psychometric characteristics (Barozzi et al. 2014; Visser et al. 2008; Schwesig, Becker, et Fischer 2014). However, posturography performed in a static standing position in the laboratory with no internal or external disturbances does not represent real life situations. Computerised dynamic posturography addresses this problem by applying external postural perturbations to the individual via a robotic platform. The advantage of this type of device is that it precisely quantifies both the perturbations induced by the platform and the resulting posturographic consequences. The NeuroCom Sensory Organization Test (SOT), derived from dynamic computerised posturographic measurements, is currently the reference test in this domain (Pletcher et al. 2017). It can be used to objectively quantify and differentiate adaptive sensory, motor and central impairments of postural stability but has been little used in children with CP so far (Stannard 2007; Stribling et Christy 2017; Özal, Aksoy, et Kerem Günel 2022).

Since the PBS is commonly used in clinical practice, it would be useful to understand how the fine control of balance measured by the SOT correlates with the different items of the PBS. This question was addressed by a study of 38

ambulatory children with CP. The results showed that the total PBS score correlated with SOT scores in static/eyes open and static/eyes closed conditions, but not with SOT scores in dynamic conditions (i.e., with the platform in motion) (Yi et al. 2012). It therefore seems essential to determine if posturographic variables evaluated in static and dynamic conditions are correlated with functional balance capacity evaluated by the PBS, in children with spastic CP.

The aims of this study were threefold: 1) to determine if CoP variables and weightbearing asymmetry vary with the child's clinical characteristics (gross motor function classification system [GMFCS] level and topography of the CP [unilateral or bilateral]) as well as with different sensory conditions (eyes open [EO], eyes closed [EC] and on a foam surface); 2) to determine how CoP variables vary with different perturbation characteristics (frequency and amplitude) and type (direction); and 3) to investigate correlations between CoP variables in static and dynamic conditions and functional balance (PBS) in children with spastic CP.

We hypothesised that children with CP and GMFCS level II would have higher levels of postural instability in static and dynamic conditions than children with CP and GMFCS level I; and that children with bilateral spastic CP would have higher levels of postural instability in static and dynamic conditions than children with unilateral spastic CP. We also hypothesised that in static conditions, different sensory conditions would affect CoP variables and weight bearing asymmetry differently, and that in dynamic conditions, the perturbation characteristics and type of perturbation would affect CoP variables differently. Finally, we hypothesised that static posturography CoP variables would correlate with PBS total and PBS static scores whereas dynamic posturography CoP parameters would correlate with PBS total and PBS dynamic items.

## 2. Method

### 2.1. Design

This observational, cross-sectional study was performed in the Movement Analysis Department (UFAM) of the *Hôpitaux de Saint-Maurice (94, France)* between January 2018 and December 2019. Ethical approval was granted by the CPP Ile-De-France V, Ref CPP 16188, N°ID-RCB 2016-A01776-45. Eligible participants were identified by physicians within the physical medicine and rehabilitation department and their parents or guardians were given information about the study. Written, informed consent for the child's participation was provided by the parents or guardians, and the children provided their assent to participate. The study is reported according to the STROBE guidelines.

### 2.2. Participants

Inclusion criteria: children aged 5-12 years with a diagnosis of CP (spastic or mixed, bilateral or unilateral) and a GMFCS level of I or II. The children had to be able to stand without assistance from their upper limbs for at least 1 minute. Exclusion criteria: uncorrected visual or auditory impairment, known vestibular disorders, botulinum toxin injection <6 months previously, orthopaedic surgery <18 months previously, and cognitive or behavioural disorders that could interfere with performance of the tests.

### 2.3. Assessments

Clinical and instrumented evaluations of balance function were performed by each participant during a single test session that lasted approximately 30 minutes. The same experienced paediatric physiotherapist

performed the Pediatric Balance Assessment and posturography for all the children.

#### ✓ Evaluation of functional balance

At the beginning of the test session, height and weight were measured and recorded for each participant. Gross motor function was evaluated using the GMFCS. The GMFCS classifies the child's postural and ambulatory capacity into 5 categories (Palisano et al. 1997; Palisano 2008). GMFCS level was classified by either a physiatrist or physiotherapist based on parent interview and clinical evaluations.

The Pediatric Balance Scale (PBS) was used to assess static and dynamic balance abilities, ranging from standing up from a sitting position to standing on one foot. Each of the 14 PBS items is rated from 0 to 4 and the scoring criteria include both qualitative and quantitative measures. Item scores are summed to obtain a total PBS score (maximum 56 points) (Franjoine, Gunther, and Taylor 2003). The PBS has good test-retest and interrater reliability when used in school age children with mild to moderate motor impairments (Kim and Ko 2010; Darr et al. 2015; Chen 2013). PBS scores correlate with the performance of functional tasks, including daily living activities (Duarte 2014; Silvia Leticia Pavão et al. 2014; Kwon and Ahn 2016). The total PBS score can be divided into sub-scores: static PBS (items 4-9) and dynamic PBS (items 1-3 and 10-14), as shown in Table 1.

	Items	Score
Static PBS	4. Standing unsupported	.../24
	5. Sitting unsupported	
	6. Standing with eyes closed	
	7. Standing with feet together	
	8. Standing with one foot in front	
	9. Standing on one foot	
Dynamic PBS	1. Sitting to standing	.../32
	2. Standing to sitting	
	3. Transfers	
	10. Turning 360 degrees	
	11. Turning to look behind	
	12. Retrieving object from floor	
	13. Placing alternate foot on stool	
	14. Reaching forward with outstretched arm	
Total PBS = Static PBS + Dynamic PBS		.../56

Table 1. Classification of PBS items between Static PBS and Dynamic PBS

✓ Instrumented balance function evaluation:  
Static and computerized dynamic  
posturography

We used a Matscan® matrix pressure measurement mat to measure posturographic variables while the child stood on a robotic postural perturbation platform. The Matscan® mat (Tekscan Inc., South Boston, USA), is a Force Sensing Array® system that captures plantar pressures, forces and displacements of the pressure centres under each foot (L foot and R foot). The MatScan® system has 2288 pressure sensors aligned in 44 rows and 52 columns, with a spatial resolution of 1.4 sensors/cm<sup>2</sup>. The Matscan® matrix pressure measurement mat has demonstrated high accuracy and moderate to good reliability (Giacomozzi 2010; Zammit, Menz, et Munteanu 2010; Kumar et al. 2014;

Goetschius et al. 2018; Hafer et al. 2013). After calibration in accordance with the manufacturer's recommendations, pressure was recorded in quasi-static conditions (child standing still, without platform-induced disturbances) and then dynamic (child standing still, with platform-induced disturbances). The sampling rate was 50 Hz and the analysis was performed using FootMat® Research Software.

The robotic postural perturbation platform consists of a mobile platform with 4 degrees of freedom. It is similar to the Equitest, which is widely used in clinical practice and research (Müller, Geißler, et Guntinas-Lichius 2016; Ferber-Viart et al. 2007; Ionescu, Dubreuil, et Ferber-Viart C 2005). The robotic postural perturbation platform induces programmed destabilizations that are controlled via a computer interface (duration, frequency and

amplitude). The destabilizations are of increasing difficulty (easy, moderate, difficult). The platform generates rotations around the x, y and z axes and translations along the x and y axes. To perform the translation movements along the y axis, the platform first rotates by 90°. For safety, the platform can be stopped instantly by the assessor or the subject using a dual emergency stop system at any time during the assessment. The subject is also secured using an adjustable harness that prevents any fall from the platform.

#### Static Posturography

Static balance was evaluated during 3 quiet standing tasks that challenged visual and somatosensory inputs: eyes open on a firm surface (EO), eyes closed on a firm surface (EC), and eyes open on a foam surface (Foam).

- One minute with eyes open (EO). The instruction was to "stand as still as possible while staring at the small yellow face". A yellow smiley was placed in front of the child at eye level (the height of the smiley was changed for each child). In the EO and EOF conditions, the children were instructed to look straight ahead.
- One minute with eyes closed (EC). The instruction was to "stand as still as possible". The child wore a blindfold to ensure no vision.
- One minute with eyes open, on the Airex Balance Pad® postural memory foam (dimensions L48x W 39.9 x H 6.1 centimetres) that was placed atop the MatScan. The instruction was to "stand as still as possible while staring at the small yellow face". A yellow smiley was placed in front of the child at eye level (the height of the smiley was changed for each child).

The children were asked to stand with their feet hip-width apart and parallel to the anterior-posterior axis of the force plate, arms by their sides, and to look straight ahead. Each standing task was recorded for 1 minute. A rest period of at least 30 seconds was provided between each condition, and the child could sit during that period if necessary. The assessment was performed in a quiet room with no external distractions.

#### Computerised Dynamic Posturography

Dynamic balance was evaluated using a succession of 4 conditions that varied from low to high difficulty in terms of balance (Table 2):

- LFLA: Low Frequency, Low Amplitude
- LFHA: Low Frequency, High Amplitude
- HFLA: High Frequency, Low Amplitude
- HFHA: High Frequency, High Amplitude

Each condition involved 5 types of perturbation induced by the platform (Table 2):

- Rotations around the x-axis (Rx)
- Rotations around the y-axis (Ry)
- Rotations around the z-axis (Rz)
- Translation along the x-axis (Tx)
- Translation along the y-axis (Ty)

		Rotations			Translations	
		Rx	Ry	Rz	Tx	Ty
Frequency	LF	0,2 Hz	0,2 Hz	0,2 Hz	0,2 Hz	0,2 Hz
	HF	0,4 Hz	0,4 Hz	0,4 Hz	0,4 Hz	0,4 Hz
Amplitude	LA	[-5°; +5°]	[-5°; +5°]	[-15°; +15°]	[-5cm; +5cm]	[-5cm; +5cm]
	HA	[-10°; +10°]	[-10°; +10°]	[-30°; +30°]	[-10cm; +10cm]	[-10cm; +10cm]

Table 2: Perturbations characteristics

The conditions were performed in the order shown in Table 3. In each condition, the 5 types of perturbations were performed in a random order so that they could not be anticipated by the child.

The perturbations were separated by a 5 s pause, except for the Tx perturbation since the platform took >5 s to rotate 90° to reach the

translation axis in the Matscan® reference frame.

The instruction was to "stand as still as possible while staring at the small yellow face" placed in front of the child at eye level. The child could ask to get off the platform at any time for any reason. Breaks were provided between each condition.

Condition	Order of the perturbations	Duration (s)
LFHA	RyRzRxTxTy	~ 150 s
HFLA	TyRxRzTxRy	~ 155 s
LFHA	TxRxRyTyRz	~ 165 s
HFHA	RzTxTyRxRy	~ 160 s

Table 3 : Perturbations order

The condition was considered to have been successfully completed if the child kept their balance and their feet remained in contact with the Matscan® mat. If one foot left the mat, during one of the perturbations, the condition was considered as a failure. Two attempts were allowed for each condition. A subsequent condition was only performed if the child had successfully completed the previous condition.

#### Processing of posturographic data

The following temporal posturographic data were recorded using the Matscan® mat at a frequency ( $f_0$ ) of 50 Hz:

- The position of the centre of pressure in the ML and AP coordinates:  $\overline{CdP}(t)$
- Percentage weightbearing right foot:  $\%Appui_d(t)$
- Percentage weightbearing left foot:  $\%Appui_g(t)$

The raw data was then processed using Matlab R2022b (9.13.0.2049777, 64-bit win64, August 24, 2022). Data filtering: The time series  $\overline{CdP}(t)$  was filtered using a 4th order Butterworth low-pass filter with a cut-off frequency of 10 Hz to remove the signal noise linked to the spatial resolution of the Matscan® mat.

Posturographic variables were calculated according to the recommendations by Quijoux et al. (Quijoux et al. 2021): the length of the statokinesigram and its ML and AP components (mm), the ML and AP displacement amplitudes of the CoP (mm), the mean displacement velocities of the CoP and its ML and AP components (mm/s), and the 95% confidence ellipse area of the CoP positions (mm<sup>2</sup>). The difference in percentage weightbearing between the right and left feet was calculated to quantify the asymmetry.

#### ✓ Data Analysis

Descriptive statistics (means and standard deviations) were calculated for age, height, and weight, and PBS total score and sub scores.

For static posture: The Wilcoxon Mann-Whitney test was used to determine if PBS and posturographic variables varied according to the GMFCS level (I or II), or the CP topography (unilateral or bilateral). Then, repeated measures ANOVA was applied on the total population to evaluate changes in the posturographic variables according to the evaluation condition (YO/YF/Foam).



The relationships between PBS total score and sub scores and posturographic variables in static and dynamic conditions was evaluated using Spearman's correlation coefficient because the data were not normally distributed (Shapiro-Wilk test). The p level was set at 0.05 and all analyses were performed using JASP software (version 0.17.1, <https://jasp-stats.org/>).

### 3. Results

#### ✓ *Participant characteristics*

In total, 35 children with spastic CP, aged 5 to 12 years (mean = 8.9, SD =2.1) participated in this study; 22 had unilateral spastic CP, and 13 had bilateral spastic CP; 24 children were classified as having a Gross Motor Function Classification System (GMFCS) level of I, and 11 were classified as GMFCS level II.

Demographic characteristics, topography, GMFCS levels, and PBS total, PBS static and PBS dynamic scores, are presented in Table 4.

#### ✓ *Static Posturography*

All children performed all 3 sensory conditions (EO, EC and Foam) in quiet standing successfully without losing balance or using a balance-recovering stepping reaction. No CoP variables differed between GMFCS level and CP topography in static conditions (Table 5).

Weightbearing asymmetry ( $p < 0.05$ ) and sway path length increased between EO and Foam conditions, and between EC and Foam conditions ( $p < 0.001$ ). Medio-Lateral CoP position amplitude reduced between EO and EC conditions ( $p < 0.05$ ), and increased between EC and Foam conditions ( $p < 0.001$ ) (Figure 1).

	Whole sample N = 35	GMFCS level		CP topography	
		I n = 24	II n = 11	Unilateral n = 22	Bilateral n = 13
Age (years)	8.9 ± 2.1	8.7 ± 2.1	9.2 ± 2.1	8.8 ± 2.1	9.1 ± 2.0
Weight (kg)	31.0 ± 11.3	30.7 ± 11.5	31.7 ± 10.9	29.8 ± 12.2	33.1 ± 9.4
BMI (kg/m <sup>2</sup> )	17.1 ± 3.1	16.8 ± 3.3	17.6 ± 2.8	16.7 ± 3.2	17.6 ± 3.0
Total PBS (.../56)	51.1 ± 4.0	52.7 ± 2.4	47.7 ± 4.7	52.0 ± 3.4	49.8 ± 4.6
Static PBS (.../24)	21.5 ± 2.4	22.3 ± 1.7	19.5 ± 2.6	22.1 ± 2.0	20.3 ± 2.6
Dynamic PBS (.../32)	29.7 ± 1.8	30.4 ± 1.2	28.2 ± 1.9	29.8 ± 1.5	29.5 ± 2.1

Values are Mean ± SD

BMI: Body Mass Index; CP: Cerebral Palsy; GMFCS: Gross Motor Function Classification System; PBS: Pediatric balance Scale; Static PBS: Items 4 to 9 of the PBS; Dynamic PBS: Items 1 to 3 and 10 to 14 of the PBS

**Table 4: Age, height, weight and PBS scores for the whole sample, and according to GMFCS level and CP topography**

		Whole sample n = 35	GMFCS level			CP topography		
			I n = 24	II n = 11	p	Unilateral n = 22	Bilateral n = 13	p
PBS	Total PBS (.../56)	51.1 ± 4.0	52.7 ± 2.4	47.7 ± 4.7	0.002**	52.0 ± 3.4	49.8 ± 4.6	0.131
	Static PBS (.../24)	21.5 ± 2.4	22.3 ± 1.7	19.5 ± 2.6	0.003**	22.1 ± 2.0	20.3 ± 2.6	0.035*
	Dynamic PBS (.../32)	29.7 ± 1.8	30.4 ± 1.2	28.2 ± 1.9	0.002**	29.8 ± 1.5	29.5 ± 2.1	0.821
EO	Sway Path length (mm)	1975 ± 1539	2044 ± 1775	1824 ± 792	0.820	1740 ± 700	2372 ± 2301	1.000
	Amp ML (mm)	74.6 ± 80.9	71.3 ± 73.0	81.6 ± 95.5	0.903	57.4 ± 32.9	103.6 ± 120.2	0.699
	Amp AP (mm)	67.8 ± 68.9	62.2 ± 39.3	80.1 ± 107.4	0.713	55.5 ± 26.2	88.7 ± 104.6	0.906
	Asymmetry (delta %)	16.2 ± 14.0	16.2 ± 14.6	16.2 ± 12.3	0.958	15.8 ± 14.9	16.9 ± 12.1	0.625
	Ellipse conf 95% (mm <sup>2</sup> )	3366 ± 6186	3477 ± 6711	3124 ± 4837	0.740	2028 ± 1927	5631 ± 9411	0.987
EC	Sway Path length (mm)	1678 ± 755	1715 ± 848	1599 ± 485	0.820	1827 ± 851	1428 ± 456	0.149
	Amp ML (mm)	39.9 ± 20.6	40.2 ± 23.3	39.3 ± 13.0	0.766	41.5 ± 18.7	37.2 ± 23.2	0.287
	Amp AP (mm)	48.1 ± 16.5	46.8 ± 14.0	50.9 ± 20.7	0.636	48.4 ± 16.4	47.5 ± 16.8	0.775
	Asymmetry (delta %)	17.4 ± 15.0	18.3 ± 15.7	15.7 ± 13.3	0.820	17.1 ± 15.7	18.0 ± 13.8	0.649
	Ellipse conf 95% (mm <sup>2</sup> )	1227 ± 859	1080 ± 724	1547 ± 1026	0.334	1242 ± 785	1201 ± 971	0.625
Foam	Sway Path length (mm)	4161 ± 1695	4149 ± 1697	4185 ± 1688	0.636	4295 ± 1853	3933 ± 1354	0.853
	Amp ML (mm)	114.9 ± 45.3	121.2 ± 44.6	101.2 ± 43.9	0.186	122.2 ± 42.4	102.5 ± 47.4	0.169
	Amp AP (mm)	69.7 ± 18.8	68.1 ± 16.8	73.2 ± 22.1	0.540	72.9 ± 18.5	64.2 ± 18.0	0.229
	Asymmetry (delta %)	25.7 ± 20.4	21.7 ± 17.7	34.3 ± 22.9	0.174	27.4 ± 21.4	22.8 ± 18.2	0.511
	Ellipse conf 95% (mm <sup>2</sup> )	5231 ± 3377	5655 ± 3671	4308 ± 2375	0.430	5493 ± 2486	4790 ± 4465	0.098

Table 5: PBS scores and posturographic variables for the whole sample and according to GMFCS level and CP topography

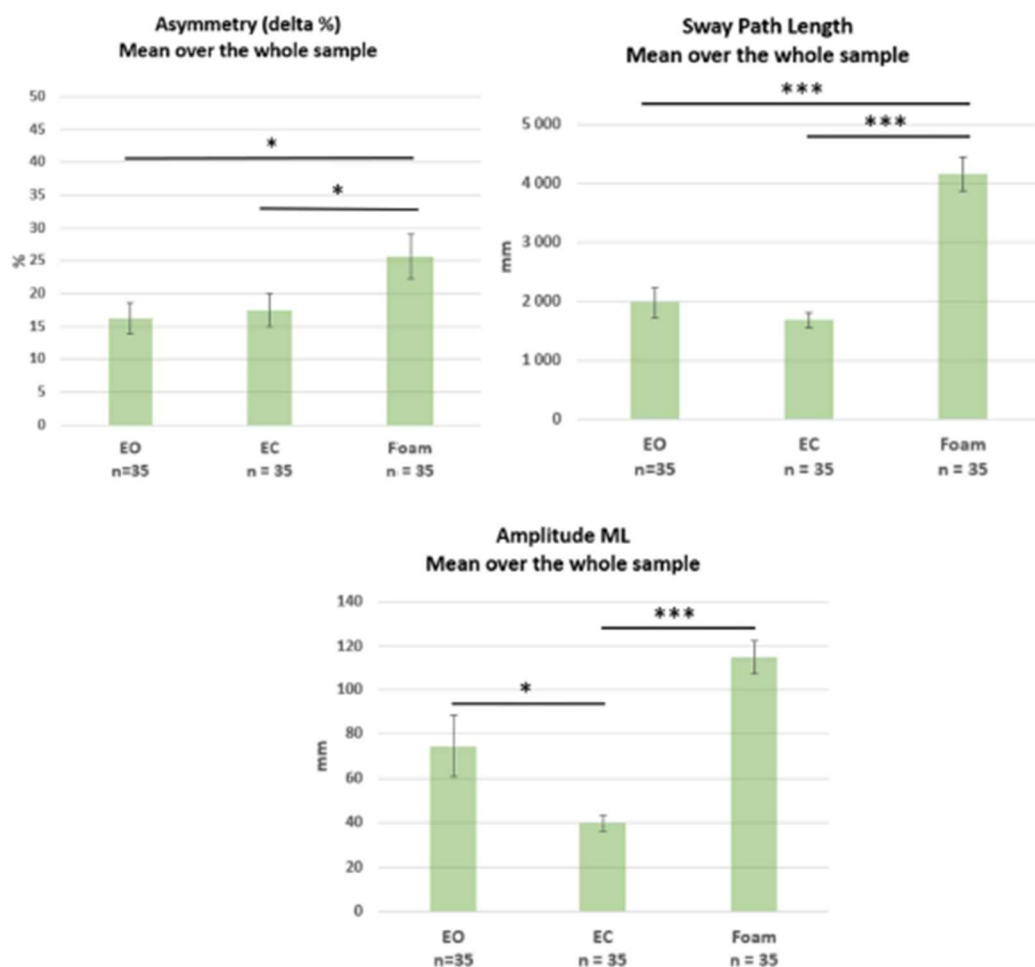


Figure 1: Results for the three static conditions. Top left: Asymmetry of weightbearing. Top right: Sway path length. Bottom: ML amplitude. Vertical bars show mean values and error bars are standard deviations, significant difference at \*  $p < 0.05$ ; \*\*  $p < 0.01$ ; \*\*\*  $p < 0.001$

✓ Correlations between PBS scores and static posturography

With EC, weak significant negative correlations were found between the Dynamic PBS score and the Medio-Lateral CoP position amplitude, and between the Dynamic PBS score and the 95% confidence ellipse area of the CoP position (Table 6). No other significant correlations were found between the PBS scores or sub-scores and the posturographic parameters in static conditions with eyes open, eyes closed or on the foam.

✓ Correlations between PBS scores and computerized dynamic posturography

For the LFLA condition (n=22), a moderate significant negative correlation was found between ML Sway Path Length and Dynamic PBS score.

For the LFHA condition (n=12), a moderate significant negative correlation was found between Sway Path Length and PBS Static score.

For the HFLA condition (n=20), a moderate significant negative correlation was found between weight bearing asymmetry and PBS Dynamic score.

For the HFHA condition (n=5), a strong significant positive correlation was found

between Sway Path in the ML direction, ML CoP position amplitude, the 95% confidence ellipse area of the CoP positions and PBS Dynamic score (Table 7).

For Rx perturbations at LFLA, a moderate significant negative correlation was found between ML Sway Path length and PBS Dynamic score, and between ML CoP position amplitude and PBS Dynamic score.

No other significant correlations were found between posturographic variables during Ry Rz Tx Ty perturbations and PBS scores or sub scores (Table 8).

N = 35		r and p-values										
		PBS	Static PBS	Dynamic PBS								
EO	Sway Path length (mm)	-0,288	-0,324	-0,2								
	Amp ML (mm)	-0,021	-0,011	-0,072								
	Amp AP (mm)	0,063	0,041	0,074								
	Asymmetry (delta %)	0,00028	-0,036	0,078								
	Ellipse conf 95% (mm <sup>2</sup> )	-0,074	-0,07	-0,092								
EC	Sway Path length (mm)	-0,295	-0,253	-0,329								
	Amp ML (mm)	-0,275	-0,188	-0,367*								
	Amp AP (mm)	-0,224	-0,166	-0,273								
	Asymmetry (delta %)	-0,195	-0,134	-0,173								
	Ellipse conf 95% (mm <sup>2</sup> )	-0,303	-0,218	-0,391*								
Foam	Sway Path length (mm)	-0,269	-0,288	-0,185								
	Amp ML (mm)	-0,057	0,017	-0,166								
	Amp AP (mm)	-0,002	0,015	-0,062								
	Asymmetry (delta %)	0,005	-0,008	0,029								
	Ellipse conf 95% (mm <sup>2</sup> )	0,025	0,115	-0,108								
<p>Values are p-values; * <math>p &lt; 0.05</math>; ** <math>p &lt; 0.01</math>;  <i>r</i>: Spearman's rho</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Strong correlation</td> <td><math>0,6 \leq  r </math></td> </tr> <tr> <td>Moderate correlation</td> <td><math>0,4 \leq  r  &lt; 0,6</math></td> </tr> <tr> <td>Weak correlation</td> <td><math>0,2 \leq  r  &lt; 0,4</math></td> </tr> <tr> <td>Very weak correlation</td> <td><math> r  &lt; 0,2</math></td> </tr> </tbody> </table>					Strong correlation	$0,6 \leq  r $	Moderate correlation	$0,4 \leq  r  < 0,6$	Weak correlation	$0,2 \leq  r  < 0,4$	Very weak correlation	$ r  < 0,2$
Strong correlation	$0,6 \leq  r $											
Moderate correlation	$0,4 \leq  r  < 0,6$											
Weak correlation	$0,2 \leq  r  < 0,4$											
Very weak correlation	$ r  < 0,2$											

Amp ML: Medio-Lateral CoP position amplitude; Amp AP: Antero-Posterior CoP position amplitude; Ellipse conf 95%: 95% confidence ellipse area of the CoP positions; BMI: Body Mass Index; CoP: Center of Pressure; GMFCS: Gross Motor Function Classification System; PBS: Pediatric balance Scale; Static PBS: Items 4 to 9 of the PBS; Dynamic PBS: Items 1 to 3 and 10 to 14 of the PBS; EO: Eyes Opened; EC: Eyes Closed

**Table 6 : Spearman Rank Correlation coefficients between PBS and Sway Parameters in static condition**

		r and p-values										
		PBS	Static PBS	Dynamic PBS								
LFLA n=22	Sway Path length (mm)	-0,091	0,046	-0,298								
	Sway Path ML length (mm)	-0,216	-0,045	-0,465*								
	Sway Path AP length (mm)	-0,01	0,094	-0,177								
	Amp ML (mm)	0,106	0,336	-0,12								
	Amp AP (mm)	0,292	0,418	0,154								
	Asymmetry (delta %)	-0,295	-0,278	-0,342								
	Ellipse conf 95% area (mm <sup>2</sup> )	0,142	0,41	-0,142								
LFHA n=12	Sway Path length (mm)	-0,575	-0,582*	-0,392								
	Sway Path ML length (mm)	-0,5	-0,575	-0,279								
	Sway Path AP length (mm)	0,121	-0,044	0,17								
	Amp ML (mm)	-0,497	-0,24	-0,513								
	Amp AP (mm)	0,093	0,109	-0,057								
	Asymmetry (delta %)	-0,389	-0,218	-0,343								
	Ellipse conf 95% area (mm <sup>2</sup> )	0,046	0,109	-0,068								
HFLA n=20	Sway Path length (mm)	-0,074	0,129	-0,265								
	Sway Path ML length (mm)	0,039	0,247	-0,202								
	Sway Path AP length (mm)	-0,281	-0,094	-0,372								
	Amp ML (mm)	0,116	0,276	-0,013								
	Amp AP (mm)	-0,204	-0,038	-0,302								
	Asymmetry (delta %)	-0,477	-0,306	-0,551*								
	Ellipse conf 95% area (mm <sup>2</sup> )	-0,038	0,183	-0,192								
HFHA n=5	Sway Path length (mm)	0,224	0,58	-0,289								
	Sway Path ML length (mm)	0,671	0,949*	0								
	Sway Path AP length (mm)	-0,224	0	-0,289								
	Amp ML (mm)	0,671	0,949*	0								
	Amp AP (mm)	0,447	0,791	-0,289								
	Asymmetry (delta %)	-0,224	0,264	-0,866								
	Ellipse conf 95% area (mm <sup>2</sup> )	0,671	0,949*	0								
<p>Values are r-values; * <math>p &lt; 0.05</math>; ** <math>p &lt; 0.01</math>;</p> <p>r: Spearman's rho</p> <table border="1"> <tr> <td>Strong correlation</td> <td><math>0,6 \leq  r </math></td> </tr> <tr> <td>Moderate correlation</td> <td><math>0,4 \leq  r  &lt; 0,6</math></td> </tr> <tr> <td>Weak correlation</td> <td><math>0,2 \leq  r  &lt; 0,4</math></td> </tr> <tr> <td>Very week correlation</td> <td><math> r  &lt; 0,2</math></td> </tr> </table>					Strong correlation	$0,6 \leq  r $	Moderate correlation	$0,4 \leq  r  < 0,6$	Weak correlation	$0,2 \leq  r  < 0,4$	Very week correlation	$ r  < 0,2$
Strong correlation	$0,6 \leq  r $											
Moderate correlation	$0,4 \leq  r  < 0,6$											
Weak correlation	$0,2 \leq  r  < 0,4$											
Very week correlation	$ r  < 0,2$											

Amp ML: Medio-Lateral CoP position amplitude; Amp AP: Antero-Posterior CoP position amplitude; Ellipse conf 95% area: 95% confidence ellipse area of the CoP positions; BMI: Body Mass Index; CoP: Center of Pressure; GMFCS: Gross Motor Function Classification System; PBS: Pediatric balance Scale; Static PBS: Items 4 to 9 of the PBS; Dynamic PBS: Items 1 to 3 and 10 to 14 of the PBS; LFLA: Low Frequency Low Amplitude; LFHA: Low Frequency High Amplitude; HFLA: High Frequency Low Amplitude; HFHA: High Frequency High Amplitude

Table 7: Spearman Rank Correlation coefficients between PBS and Sway Parameters in dynamic condition, regarding frequency and amplitude of the perturbation

LFLA n=22		r and p-values										
		PBS	Static PBS	Dynamic PBS								
Rx	Sway Path length (mm)	0.624	0.951	0.194								
	Sway Path ML length (mm)	0.084	0.525	0.005**								
	Sway Path AP length (mm)	0.890	0.654	0.561								
	Amp ML (mm)	0.054	0.590	0.004**								
	Amp AP (mm)	0.465	0.281	0.533								
	Asymmetry (delta %)											
	Ellipse conf 95% area (mm <sup>2</sup> )	0.944	0.363	0.396								
Ry	Sway Path length (mm)	0.964	0.684	0.290								
	Sway Path ML length (mm)	0.904	0.547	0.354								
	Sway Path AP length (mm)	0.621	0.939	0.200								
	Amp ML (mm)	0.388	0.074	0.798								
	Amp AP (mm)	0.596	0.978	0.301								
	Asymmetry (delta %)											
	Ellipse conf 95% area (mm <sup>2</sup> )	0.918	0.543	0.467								
Rz	Sway Path length (mm)	0.212	0.430	0.083								
	Sway Path ML length (mm)	0.268	0.400	0.135								
	Sway Path AP length (mm)	0.287	0.543	0.176								
	Amp ML (mm)	0.603	0.516	0.939								
	Amp AP (mm)	0.787	0.776	0.627								
	Asymmetry (delta %)											
	Ellipse conf 95% area (mm <sup>2</sup> )	0.976	0.625	0.566								
Tx	Sway Path length (mm)	0.402	0.799	0.137								
	Sway Path ML length (mm)	0.900	0.927	0.559								
	Sway Path AP length (mm)	0.603	0.982	0.276								
	Amp ML (mm)	0.120	0.277	0.070								
	Amp AP (mm)	0.060	0.223	0.089								
	Asymmetry (delta %)											
	Ellipse conf 95% area (mm <sup>2</sup> )	0.726	0.535	0.689								
Ty	Sway Path length (mm)	0.970	0.925	0.735								
	Sway Path ML length (mm)	0.102	0.203	0.082								
	Sway Path AP length (mm)	0.088	0.123	0.118								
	Amp ML (mm)	0.418	0.537	0.343								
	Amp AP (mm)	0.247	0.174	0.355								
	Asymmetry (delta %)											
	Ellipse conf 95% area (mm <sup>2</sup> )	0.675	0.397	0.978								
Values are p-values; *p<0.05; **p<0.01; r: Spearman's rho												
		<table border="1"> <tr> <td>Strong correlation</td> <td><math>0.7 \leq  r </math></td> </tr> <tr> <td>Moderate correlation</td> <td><math>0.6 \leq  r  &lt; 0.7</math></td> </tr> <tr> <td>Weak correlation</td> <td><math>0.2 \leq  r  &lt; 0.4</math></td> </tr> <tr> <td>Very weak correlation</td> <td><math> r  &lt; 0.2</math></td> </tr> </table>			Strong correlation	$0.7 \leq  r $	Moderate correlation	$0.6 \leq  r  < 0.7$	Weak correlation	$0.2 \leq  r  < 0.4$	Very weak correlation	$ r  < 0.2$
Strong correlation	$0.7 \leq  r $											
Moderate correlation	$0.6 \leq  r  < 0.7$											
Weak correlation	$0.2 \leq  r  < 0.4$											
Very weak correlation	$ r  < 0.2$											

Amp ML: Medio-Lateral CoP position amplitude; Amp AP: Antero-Posterior CoP position amplitude; Ellipse conf 95% area: 95% confidence ellipse area of the CoP positions; BMI: Body Mass Index; CoP: Center of Pressure; GMFCS: Gross Motor Function Classification System; PBS: Pediatric balance Scale; Static PBS: Items 4 to 9 of the PBS; Dynamic PBS: Items 1 to 3 and 10 to 14 of the PBS LFLA: Low Frequency Low Amplitude; LFHA: Low Frequency High Amplitude; HFLA: High Frequency Low Amplitude; HFHA: High Frequency High Amplitude

**Table 8: Spearman Rank Correlation coefficients between PBS and Sway Parameters in dynamic condition, regarding type and direction of the perturbation**

#### 4. Discussion

##### 4.1. Summary of findings

This posturographic study of 35 ambulatory children with spastic CP showed that in static conditions on foam, the length of the statokinesigram and weight bearing asymmetry increased significantly compared with the EO and EC conditions on a stable surface. This indicates that altering somatosensory information reduces stability more than removing visual information in these children, although Medio-Lateral CoP position amplitude was significantly shorter with EC than EO.

In the static condition with EC, there was a weak, negative correlation between Medio-Lateral CoP position amplitude and Dynamic PBS score, and between the 95% confidence ellipse area of the CoP positions and Dynamic PBS score. Better Dynamic PBS scores were associated with a smaller COP dispersion.

In the dynamic condition with Low Frequency perturbations, there was a moderate, negative correlation between Medio-Lateral CoP position amplitude and Dynamic PBS score for the Low Amplitude perturbations, and a moderate negative correlation between Sway Path Length and Static PBS score for the High Amplitude perturbations. With the High Frequency perturbations, there was a moderate negative correlation between weight bearing asymmetry and Dynamic PBS Score.

##### 4.2. Comparison of results with the literature

- ✓ PBS total varie en fonction GMFCS et PBS statique varie en fonction de la topographie de l'atteinte

The significant differences between PBS total, static and dynamic scores according to GMFCS levels (children with GMFCS I had better functional balance) are in line with the results of Pavão 2014. Their study of 58 children with

CP (aged 0 to 18 years, mean 8.9 years) and GMFCS I to V found that PBS total scores could discriminate between GMFCS levels (Silvia Leticia Pavão et al. 2014). Franjoine et al. 2003 also found that the PBS distinguished between the GMFCS levels of children with mild and moderate impairment (Franjoine, Gunther, et Taylor 2003). These results were further confirmed by Yi 2012 (Yi et al. 2012).

Children at GMFCS level I showed a significantly higher global motor capacity (GMFM-66, GMFM-88, D-dimension and E-dimension, PBS and 6MWT) than those at level II or III (Suk et al. 2021).

Static PBS scores varied according to the topography of the CP: children with unilateral CP had higher PBS static scores than those with bilateral CP, although there was no difference for the total PBS score. We suggest that the higher static PBS scores for those with unilateral CP related to the fact children with hemiparesis have one lower limb that performs balance function relatively normally, whereas those with bilateral CP do not.

- ✓ Posturo statique avec perturbations des afférences sensorielles

The significant increase in the length of the statokinesigram and weightbearing asymmetry in the Foam condition compared to EO and EC (which were performed on a firm surface) suggests that altering somatosensory information is more destabilising than removing visual information for children with CP. Saxena et al. (2014) compared posturographic variables in children with unilateral and bilateral CP and typically developing (TD) children, aged 5 to 12 years, and found a different effect of sensory perturbation depending on the CP topography. Children with unilateral CP were able to use their less affected lower limb to adapt to the conditions of postural instability. Our study revealed that children with unilateral CP were more able to refine postural adjustments to the different environmental conditions than the children with bilateral CP. This was also shown in another study (L. M. Nashner, Shumway-Cook, et Marin 1983).

In the study by Saxena et al., children with bilateral spastic CP were most stable in the EO condition, followed by EC, then EOF, and were least stable in the ECF condition (EO > EC > EOF > ECF). In contrast, in our study, stability was poorest in the EC condition (EO>EOF>EC). This difference is likely because the children in the study by Saxena et al. had more severe impairment of gross motor function (GMFSC II and III) than the children in the present study (Saxena, Rao, et Kumaran 2014). The TD children in that study were found to be most stable with EO, followed by EOF, then EC (EO > EOF > EC) for both sway velocities (ML and AP); therefore, the postural behaviour of the children in the present study with GMFCS levels I and II was similar to that of the TD children in the study by Liao et al. (1997) found similar results to us (Liao et al. 1997). The results of these studies suggest that children with CP are more dependent on somatosensory information than TD children because postural instability was greatest when standing on the foam.

Da Costa et al. studied posturographic variables in children with moderate to severe CP in static sitting. The children with moderate to severe CP had less variable, more locally stable dynamic CoP trajectories and less complexity of their motor programs than TD children and children with mild CP. Furthermore, when sitting on foam without vision, the CoP trajectories were more variable. This finding shows that children with CP were able to adjust the structure and complexity of their postural control responses in sitting according to the sensory conditions, although the posturographic variables of these children are impaired compared with TD children (Da Costa et al. 2019).

We found a significant decrease in Medio-Lateral CoP position amplitude in the EC condition compared with EO. Other studies have evaluated conditions with visual perturbations, but their results are contradictory (Liao et al. 1997; Rose et al. 2002; Donker et al. 2008). Some found that postural control was better with EO (Rose et al. 2002). Donker et al. found that children with CP had better postural control with EC than EO (Donker et al. 2008) during quiet standing tasks on a firm surface. However, in children aged between 5 and 12 years of age, the difference between the use of visual information to maintain balance in

standing in children with spastic bilateral CP compared with TD children remains elusive.

Another study found that with EO, the mean velocity of the CoP was significantly greater in children with CP than TD children ( $p = 0,043$ ). With EC, they found a significant increase in CoP surface and greater use of the otolithic vestibular system in children with CP (Gatica et al. 2014). These results are in contrast with our findings. In our study, with EC, the amplitude of ML CoP oscillations reduced. According to the suggestion by Wallard et al., the reduction of lower limb joint degrees of freedom facilitates postural organisation because of an "en bloc" postural strategy (Wallard et al. 2012; Wallard 2014).

✓ Correlations between PBS scores and computerized dynamic posturography

Our results showed that for low frequency-low amplitude perturbations, ML CoP position amplitude was associated with higher dynamic PBS scores. For low frequency-high amplitude perturbations, Sway Path Length was associated with higher PBS static scores. These results are difficult to compare with the literature because of the few studies using computerized dynamic posturography in children with CP and the fact the postural perturbation protocol that we used on the robotic platform is not standardised.

In a study of 38 children with spastic CP, GMFCS I to III, total PBS score was moderately correlated with the balance score of the Sensory Organization Test with EO and EC on a stable surface. The authors were unable to interpret the results of tests in dynamic conditions with platform-induced perturbations because the test was too difficult for most children included (Yi et al. 2012).

A recent study evaluated the relationship between lower limb impairment and trunk control on balance function and functional mobility (Sensory Organisation Test, GMFM section E and TUG) in children and adolescents with spastic CP, however they did not evaluate the influence of platform-induced perturbations on functional balance scores (Ozal, Aksoy, et Gunel 2022).

Dynamic posturography can also be performed during the displacement of the CoP during



voluntary movement. For example, Kenis et al. evaluated postural stability in children and adolescents with spastic unilateral CP and TD children during a sit-to-stand task and a turning task to the left and right. These functional tests were performed on a force platform, and the results showed slower weight transfer during sit-to-stand and slower turning time in the children with CP than TD children. Furthermore, sway velocity was higher during turning, indicating difficulty controlling dynamic balance (Kenis-Coskun et al. 2016).

#### 4.3. Study limitations

This study has several limitations. The small number of participants ( $n = 35$ ) limits the generalizability of the results and prevents comparisons relating to the topography of the CP (unilateral or bilateral). Static posturography in standing in laboratory conditions may not be fully representative of real-life conditions. However, the test-retest reliability of the measurement of velocity is excellent and the reliability of the surface measurement is moderate (Barozzi et al. 2014). The posturography evaluation method can influence the results, however recommendations exist for static recordings. Unfortunately, we were unable to fully follow the recent recommendations of Reutimann et al. and we conducted recordings of 60 s at 50 Hz with one repetition per condition (Reutimann et al. 2022). Also, no standardised methods have been developed for dynamic posturography.

#### 4.4. Clinical implications and perspectives

Postural stability is necessary for the capacity to explore and interact with the environment. It has been described as an anchor for functional movement and activity (Saxena, Rao, et Kumaran 2014). Poor postural control limits gross motor ability and interaction with peers at home and in the community, affecting the overall quality of life of children with CP. Postural control involves the control of body position in space for both stability and orientation, and relies on the interaction of visual, somatosensory and vestibular information, as well as motor action. The assessment of postural stability in the anti-

gravity postures of sitting or standing, for example, is part of the physiotherapy assessment for a child with an intellectual disability.

Most studies limit the posturographic study of balance to individuals who can stand without assistance from the upper limbs (i.e., GMFCS I, II or III). Recently, some authors have evaluated CoP displacement in sitting to enable postural control evaluation in children with moderate to severe CP (GMFCS III and IV) (Da Costa et al. 2019; Pierret et al. 2021). The functional independence of children with these GMFCS levels depends on their static and dynamic balance capacities, similarly to children with GMFCS levels I and II (Saavedra 2015). We had initially planned to include children with GMFCS III but they were unable to maintain standing balance during the perturbations on the robotic platform.

Futures studies should include younger (below 5 years) and older (over 12 years) children. Balance function follows a process of maturation from birth to the start of adulthood (Conner et al. 2019). The secondary musculoskeletal problems that impact on balance function are particularly accentuated during adolescence (Patel et al. 2020; Graham et al. 2021). Future studies could also include other neuromotor types of CP such as ataxic or dyskinetic CP. In our study we only included children with spastic CP because a homogeneous sample facilitates interpretation of the results. Finally, we did not thoroughly investigate the presence of comorbidities, such as intellectual disabilities or attention deficit disorders, that could potentially impact an individual's balance capabilities.

The evaluation of optimal postural control in children with CP requires examining the performance of all the systems to profile the impairments and enable the development of targeted rehabilitation programs. Posturography in both static and dynamic conditions can be used to precisely quantify balance issues by analysis of CoP displacement, however it does not provide an understanding of these issues. Balance difficulties in children with CP are caused by the association of several types of

impairment: sensory, central and musculoskeletal. Therefore, to evaluate them, different evaluation methods must be crossed (kinematic, electromyographic etc.) to explore muscle synergies (Glass et al. 2022; Kumai et

al. 2022; Ghislieri et al. 2020) and postural balance strategies (Glass et al. 2022; Heidt et al. 2021; Mills, Levac, et Sveistrup 2018; Kumai et al. 2022; Ting et al. 2015).

## References

- Almutairi, A., G. D. Cochrane, et J. B. Christy. 2019. « Vestibular and Oculomotor Function in Children with CP: Descriptive Study ». *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology* 119 (avril): 15-21. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2018.12.038>.
- Barela, José A., Grietje M. Jaspers Focks, Toke Hilgeholt, Ana M. F. Barela, Raquel de P. Carvalho, et Geert J. P. Savelsbergh. 2011. « Perception-Action and Adaptation in Postural Control of Children and Adolescents with Cerebral Palsy ». *Research in Developmental Disabilities* 32 (6): 2075-83. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.08.018>.
- Barozzi, Stefania, Marina Socci, Daniela Soi, Federica Di Bernardino, Giovanni Fabio, Stella Forti, Anna M. Gasbarre, Daniele Brambilla, et Antonio Cesarani. 2014. « Reliability of Postural Control Measures in Children and Young Adolescents ». *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology: Official Journal of the European Federation of Oto-Rhino-Laryngological Societies (EUFOS): Affiliated with the German Society for Oto-Rhino-Laryngology - Head and Neck Surgery* 271 (7): 2069-77. <https://doi.org/10.1007/s00405-014-2930-9>.
- Bigongiari, Aline, Flávia de Andrade e Souza, Patrícia Martins Franciulli, Semaan El Razi Neto, Rubens Correa Araujo, et Luis Mochizuki. 2011. « Anticipatory and Compensatory Postural Adjustments in Sitting in Children with Cerebral Palsy ». *Human Movement Science* 30 (3): 648-57. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2010.11.006>.
- Bleyenheuft, Yannick, et Andrew M. Gordon. 2013. « Precision Grip Control, Sensory Impairments and Their Interactions in Children with Hemiplegic Cerebral Palsy: A Systematic Review ». *Research in Developmental Disabilities* 34 (9): 3014-28. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2013.05.047>.
- Bronstein, A. M. 2016. « Multisensory Integration in Balance Control ». *Handbook of Clinical Neurology* 137: 57-66. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63437-5.00004-2>.
- Chen, Chia-ling. 2013. « Validity, Responsiveness, Minimal Detectable Change, and Minimal Clinically Important Change of Pediatric Balance Scale in Children with Cerebral Palsy ». *Research in Developmental Disabilities*, *Research in Developmental Disabilities*, 34 (3): 916-22. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2012.11.006>.
- Conner, Benjamin C., Drew A. Petersen, Jamie Pigman, James B. Tracy, Curtis L. Johnson, Kurt Manal, Freeman Miller, Christopher M. Modlesky, et Jeremy R. Crenshaw. 2019. « The Cross-Sectional Relationships between Age, Standing Static Balance, and Standing Dynamic Balance Reactions in Typically Developing Children ». *Gait & Posture* 73: 20-25. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.07.128>.
- Da Costa, Carolina Souza Neves, Silvia Leticia Pavão, Livia Pessarelli Visicato, Ana Carolina de Campos, et Nelci Adriana C. F. Rocha. 2019. « Effects of Sensory Manipulations on the Dynamical Structure of Center-of-Pressure Trajectories of Children with Cerebral Palsy during Sitting ». *Human Movement Science* 63 (février): 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2018.11.003>.
- Darr, Nancy, Mary Rose Franjoine, Suzann K. Campbell, et Everett Smith. 2015. « Psychometric Properties of the Pediatric Balance Scale Using Rasch Analysis ». *Pediatric Physical Therapy: The Official Publication of the Section on Pediatrics of the American Physical Therapy Association* 27 (4): 337-48. <https://doi.org/10.1097/PEP.000000000000178>.
- Domagalska-Szopa, Małgorzata, et Andrzej Szopa. 2017. « Postural Orientation and Standing Postural Alignment in Ambulant Children with Bilateral Cerebral Palsy ». *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)* 49 (novembre): 22-27. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2017.08.005>.

- Donker, Stella F., Annick Ledebt, Melvyn Roerdink, Geert J. P. Savelsbergh, et Peter J. Beek. 2008. « Children with Cerebral Palsy Exhibit Greater and More Regular Postural Sway than Typically Developing Children ». *Experimental Brain Research* 184 (3): 363-70. <https://doi.org/10.1007/s00221-007-1105-y>.
- Duarte, Natalia. 2014. « Correlation between Pediatric Balance Scale and Functional Test in Children with Cerebral Palsy », n° 26: 849-53.
- Ferber-Viart, C., E. Ionescu, T. Morlet, P. Froehlich, et C. Dubreuil. 2007. « Balance in Healthy Individuals Assessed with Equitest: Maturation and Normative Data for Children and Young Adults ». *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology* 71 (7): 1041-46. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2007.03.012>.
- Forbes, Patrick A., Anthony Chen, et Jean-Sébastien Blouin. 2018. « Sensorimotor Control of Standing Balance ». *Handbook of Clinical Neurology* 159: 61-83. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63916-5.00004-5>.
- Franjoine, Mary Rose, Nancy Darr, Brenda Young, Sally Westcott McCoy, et Alyssa LaForme Fiss. 2022. « Examination of the effects of age, sex, and motor ability level on balance capabilities in children with cerebral palsy GMFCS levels I, II, III and typical development using the Pediatric Balance Scale ». *Developmental neurorehabilitation* 25 (2): 115-24.
- Franjoine, Mary Rose, Joan S. Gunther, et Mary Jean Taylor. 2003. « Pediatric Balance Scale: A Modified Version of the Berg Balance Scale for the School-Age Child with Mild to Moderate Motor Impairment ». *Pediatric Physical Therapy* 15 (2): 114-28. <https://doi.org/10.1097/01.PEP.0000068117.48023.18>.
- Gan, Sue-Mae, Li-Chen Tung, Yue-Her Tang, et Chun-Hou Wang. 2008. « Psychometric Properties of Functional Balance Assessment in Children with Cerebral Palsy ». *Neurorehabilitation and Neural Repair* 22 (6): 745-53. <https://doi.org/10.1177/1545968308316474>.
- Gatica, Valeska Fabiola, Sofia Irene Velásquez, Guillermo Andrés Méndez, Eduardo Enrique Guzmán, et Carlos Guillermo Manterola. 2014. « Differences in Standing Balance in Patients with Cerebral Palsy and Typically Developing Children ». *Biomédica* 34 (1): 102-9. <https://doi.org/10.7705/biomedica.v34i1.1535>.
- Ghislieri, Marco, Marco Knafnitz, Luciana Labanca, Giuseppe Barone, Laura Bragonzoni, Maria Grazia Benedetti, et Valentina Agostini. 2020. « Muscle Synergy Assessment During Single-Leg Stance ». *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering: A Publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* 28 (12): 2914-22. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2020.3030847>.
- Giacomozzi, Claudia. 2010. « Appropriateness of Plantar Pressure Measurement Devices: A Comparative Technical Assessment ». *Gait & Posture* 32 (1): 141-44. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2010.03.014>.
- Girolami, Gay L., Takako Shiratori, et Alexander S. Aruin. 2011. « Anticipatory Postural Adjustments in Children with Hemiplegia and Diplegia ». *Journal of Electromyography and Kinesiology: Official Journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology* 21 (6): 988-97. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2011.08.013>.
- Glass, Stephen M., Lane Wildman, Cameron Brummitt, Kevin Ratchford, Grant M. Westbrook, et Adrian Aron. 2022. « Effects of Global Postural Alignment on Posture-Stabilizing Synergy and Intermuscular Coherence in Bipedal Standing ». *Experimental Brain Research* 240 (3): 841-51. <https://doi.org/10.1007/s00221-021-06291-6>.
- Goetschius, John, Mark A. Feger, Jay Hertel, et Joseph M. Hart. 2018. « Validating Center-of-Pressure Balance Measurements Using the MatScan® Pressure Mat ». *Journal of Sport Rehabilitation*, janvier, 1-5. <https://doi.org/10.1123/jsr.2017-0152>.
- González, Lucía, Juan Argüelles, Vicente González, Kristian Winge, Marta Iscar, Hugo Olmedillas, Miguel Blanco, et al. 2020. « Slackline Training in Children with Spastic Cerebral Palsy: A Randomized Clinical Trial ». *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17 (22): 8649. <https://doi.org/10.3390/ijerph17228649>.

- Graham, H. Kerr, Peter Rosenbaum, Nigel Paneth, Bernard Dan, Jean-Pierre Lin, Diane L. Damiano, Jules G. Becher, et al. 2016. « Cerebral Palsy ». *Nature Reviews. Disease Primers* 2: 15082. <https://doi.org/10.1038/nrdp.2015.82>.
- Graham, H. Kerr, Pam Thomason, Kate Willoughby, Tandy Hastings-Ison, Renee Van Stralen, Benan Dala-Ali, Peter Wong, et Erich Rutz. 2021. « Musculoskeletal pathology in cerebral palsy: A classification system and reliability study ». *Children* 8 (3): 252.
- Hafer, Jocelyn F., Mark W. Lenhoff, Jinsup Song, Joanne M. Jordan, Marian T. Hannan, et Howard J. Hillstrom. 2013. « Reliability of Plantar Pressure Platforms ». *Gait & Posture* 38 (3): 544-48. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2013.01.028>.
- Heidt, Christoph, Matia Vrankovic, Alejandro Mendoza, Karsten Hollander, Thomas Dreher, et Matthias Rueger. 2021. « Simplified Digital Balance Assessment in Typically Developing School Children ». *Gait & Posture* 84 (février): 389-94. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.01.005>.
- Ionescu, E., C. Dubreuil, et C. Ferber-Viart C. 2005. « [Physiological changes in balance control of adults aged 20 to 60 years assessed with Equitest] ». *Annales D'oto-Laryngologie Et De Chirurgie Cervico Faciale: Bulletin De La Societe D'oto-Laryngologie Des Hopitaux De Paris* 122 (5): 231-35. [https://doi.org/10.1016/s0003-438x\(05\)82354-0](https://doi.org/10.1016/s0003-438x(05)82354-0).
- Ivanenko, Yury, et Victor S. Gurfinkel. 2018. « Human Postural Control ». *Frontiers in Neuroscience* 12. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnins.2018.00171>.
- Katz-Leurer, Michal, Hemda Rotem, Ofer Keren, et Shirley Meyer. 2009. « Balance Abilities and Gait Characteristics in Post-Traumatic Brain Injury, Cerebral Palsy and Typically Developed Children ». *Developmental Neurorehabilitation* 12 (2): 100-105. <https://doi.org/10.1080/17518420902800928>.
- Kenis-Coskun, Ozge, Esra Giray, Beyhan Eren, Ozlem Ozkok, et Evrim Karadag-Saygi. 2016. « Evaluation of Postural Stability in Children with Hemiplegic Cerebral Palsy ». *Journal of Physical Therapy Science* 28 (5): 1398-1402. <https://doi.org/10.1589/jpts.28.1398>.
- Kim, Gi-Won, et Joo-Yeon Ko. 2010. « The reliability of a pediatric balance scale based on the raters' clinical work experience and test experience ». *Journal of Korean Physical Therapy* 22 (6): 35-42.
- Kingma, Herman, Gerome C. Gauchard, Catherine De Waele, Christian Van Nechel, Alexandre Bisdorff, Alain Yelnik, Mans Magnusson, et Philippe P. Perrin. 2011. « Stocktaking on the development of posturography for clinical use ». *Journal of Vestibular Research* 21 (3): 117-25.
- Krishnaprasad, K. M., Amitesh Narayan, et K. Vijay Kumar. 2022. « Association between Postural Stability and Functional Abilities in Children with Spastic Cerebral Palsy ». *Critical Reviews™ in Physical and Rehabilitation Medicine* 34 (2).
- Kumai, Ken, Yumi Ikeda, Katsuya Sakai, Keisuke Goto, Kenji Morikawa, et Keiichirou Shibata. 2022. « Brain and Muscle Activation Patterns during Postural Control Affect Static Postural Control ». *Gait & Posture* 96 (juillet): 102-8. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2022.05.017>.
- Kumar, Senthil N. S., Baharudin Omar, Ohnmar Htwe, Leonard H. Joseph, Jagannathan Krishnan, Ali Jafarzedah Esfehiani, et Lee L. Min. 2014. « Reliability, Agreement, and Validity of Digital Weighing Scale with MatScan in Limb Load Measurement ». *Journal of Rehabilitation Research and Development* 51 (4): 591-98. <https://doi.org/10.1682/JRRD.2013.07.0166>.
- Kwon, Hae-Yeon, et So-Yoon Ahn. 2016. « Correlation between the Gross Motor Performance Measurement and Pediatric Balance Scale with Respect to Movement Disorder in Children with Cerebral Palsy ». *Journal of Physical Therapy Science* 28 (8): 2279-83. <https://doi.org/10.1589/jpts.28.2279>.
- Liao, Hua-Fang, Suh-Fang Jeny, Jin-Shin Lai, Cheng Kung Cheng, et Ming-Hsia Hu. 1997. « The relation between standing balance and walking function in children with spastic diplegic cerebral palsy ». *Developmental Medicine & Child Neurology* 39 (2): 106-12.

- Lopes, Guilherme Henrique Ramos, et Ana Cristina de David. 2013. « Posturography in the analysis of postural control in children with cerebral palsy: a literature review ». *Fisioterapia e Pesquisa* 20: 97-102.
- MacKinnon, Colum D. 2018. « Sensorimotor Anatomy of Gait, Balance, and Falls ». *Handbook of Clinical Neurology* 159: 3-26. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63916-5.00001-X>.
- Massion, Jean. 1994. « Postural Control System ». *Current Opinion in Neurobiology* 4 (6): 877-87. [https://doi.org/10.1016/0959-4388\(94\)90137-6](https://doi.org/10.1016/0959-4388(94)90137-6).
- Mills, Richard, Danielle Levac, et Heidi Sveistrup. 2018. « Kinematics and Postural Muscular Activity during Continuous Oscillating Platform Movement in Children and Adolescents with Cerebral Palsy ». *Gait & Posture* 66: 13-20. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.08.002>.
- Müller, B., K. Geißler, et O. Guntinas-Lichius. 2016. « [The Sensory Organization Test on the Equitest® posturography system] ». *Laryngo- Rhino- Otologie* 95 (9): 602-3. <https://doi.org/10.1055/s-0042-114542>.
- Nashner, L. M., A. Shumway-Cook, et O. Marin. 1983. « Stance Posture Control in Select Groups of Children with Cerebral Palsy: Deficits in Sensory Organization and Muscular Coordination ». *Experimental Brain Research* 49 (3): 393-409.
- Nashner, Lewis M., et Gin McCollum. 1985. « The organization of human postural movements: A formal basis and experimental synthesis ». *Behavioral and Brain Sciences* 8 (1): 135-72. <https://doi.org/10.1017/S0140525X00020008>.
- Ozal, Cemil, Songul Aksoy, et Mintaze Kerem Gunel. 2022. « Influence of Lower Extremity Impairment and Trunk Control on Postural Control and Functional Mobility in Children with Spastic Cerebral Palsy ».
- Özal, Cemil, Songül Aksoy, et Mintaze Kerem Günel. 2022. « Postural Control Alterations in Children with Mild Forms of Spastic Cerebral Palsy ». *Pediatric Health, Medicine and Therapeutics* 13: 367-76. <https://doi.org/10.2147/PHMT.S378451>.
- Palisano, Robert. 2008. « Content validity of the expanded and revised Gross Motor Function Classification System - Palisano - 2008 - Developmental Medicine & Child Neurology - Wiley Online Library ». <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1469-8749.2008.03089.x>.
- Palisano, Robert, Peter Rosenbaum, Stephen Walter, Dianne Russell, Ellen Wood, et Barbara Galuppi. 1997. « Gross motor function classification system for cerebral palsy ». *Dev Med Child Neurol* 39 (4): 214-23.
- Papadelis, Christos, Banu Ahtam, Maria Nazarova, Donna Nimec, Brian Snyder, Patricia Ellen Grant, et Yoshio Okada. 2014. « Cortical Somatosensory Reorganization in Children with Spastic Cerebral Palsy: A Multimodal Neuroimaging Study ». *Frontiers in Human Neuroscience* 8. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnhum.2014.00725>.
- Patel, Dilip R., Mekala Neelakantan, Karan Pandher, et Joav Merrick. 2020. « Cerebral Palsy in Children: A Clinical Overview ». *Translational Pediatrics* 9 (Suppl 1): S125-35. <https://doi.org/10.21037/tp.2020.01.01>.
- Pavão, Sílvia L., Gabriela S. Nunes, Adriana N. Santos, et Nelci A. C. F. Rocha. 2014. « Relationship between Static Postural Control and the Level of Functional Abilities in Children with Cerebral Palsy ». *Brazilian Journal of Physical Therapy* 18 (4): 300-307.
- Pavão, Sílvia Leticia, Kayo Andre F. Barbosa, Tatiana de Oliveira Sato, et Nelci Adriana Cicuto Ferreira Rocha. 2014. « Functional Balance and Gross Motor Function in Children with Cerebral Palsy ». *Research in Developmental Disabilities* 35 (10): 2278-83. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2014.05.024>.
- Pavão, Sílvia Leticia, et Nelci Adriana Cicuto Ferreira Rocha. 2017. « Sensory Processing Disorders in Children with Cerebral Palsy ». *Infant Behavior & Development* 46 (février): 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.infbeh.2016.10.007>.
- Pavão, Sílvia Leticia, Adriana Neves dos Santos, Marjorie Hines Woollacott, et Nelci Adriana Cicuto Ferreira Rocha. 2013. « Assessment of Postural Control in Children with Cerebral Palsy: A

- Review ». *Research in Developmental Disabilities* 34 (5): 1367-75.  
<https://doi.org/10.1016/j.ridd.2013.01.034>.
- Pavão, Sílvia Leticia, Fernanda Pereira dos Santos Silva, Geert J. P. Savelsbergh, et Nelci Adriana Cicuto Ferreira Rocha. 2015. « Use of Sensory Information during Postural Control in Children with Cerebral Palsy: Systematic Review ». *Journal of Motor Behavior* 47 (4): 291-301.  
<https://doi.org/10.1080/00222895.2014.981498>.
- Peterka, Robert J. 2018. « Sensory Integration for Human Balance Control ». *Handbook of Clinical Neurology* 159: 27-42. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63916-5.00002-1>.
- Pierret, Jonathan, Sébastien Caudron, Jean Paysant, et Christian Beyaert. 2021. « Impaired Postural Control of Axial Segments in Children with Cerebral Palsy ». *Gait & Posture* 86 (mai): 266-72.  
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.03.012>.
- Pletcher, Erin R., Valerie J. Williams, John P. Abt, Paul M. Morgan, Jeffrey J. Parr, Meleesa F. Wohleber, Mita Lovalekar, et Timothy C. Sell. 2017. « Normative Data for the NeuroCom Sensory Organization Test in US Military Special Operations Forces ». *Journal of Athletic Training* 52 (2): 129-36. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-52.1.05>.
- Quijoux, Flavien, Alice Nicolai, Ikram Chairi, Ioannis Bargiotas, Damien Ricard, Alain Yelnik, Laurent Oudre, et al. 2021. « A review of center of pressure (COP) variables to quantify standing balance in elderly people: Algorithms and open-access code ». *Physiological Reports* 9 (22): e15067. <https://doi.org/10.14814/phy2.15067>.
- Rethwilm, Roman, Harald Böhm, Madeleine Haase, Dennis Perchthaler, Chakravarthy U. Dussa, et Peter Federolf. 2021. « Dynamic Stability in Cerebral Palsy during Walking and Running: Predictors and Regulation Strategies ». *Gait & Posture* 84 (février): 329-34.  
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2020.12.031>.
- Reutimann, Stefan, MaryJane Hill-Strathy, Carmen Krewer, Jeannine Bergmann, Friedemann Müller, Klaus Jahn, et Katrin Rau. 2022. « Influence of Footwear on Postural Sway: A Systematic Review and Meta-Analysis on Barefoot and Shod Bipedal Static Posturography in Patients and Healthy Subjects ». *Gait & Posture* 92 (février): 302-14.  
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.11.022>.
- Roncesvalles, M. N., M. W. Woollacott, et P. A. Burtner. 2002. « Neural Factors Underlying Reduced Postural Adaptability in Children with Cerebral Palsy ». *Neuroreport* 13 (18): 2407-10.  
<https://doi.org/10.1097/00001756-200212200-00006>.
- Rose, Jessica, Don R. Wolff, Vincent K. Jones, Daniel A. Bloch, John W. Oehlert, et James G. Gamble. 2002. « Postural balance in children with cerebral palsy ». *Developmental medicine and child neurology* 44 (1): 58-63.
- Rosenbaum, P., et J. W. Gorter. 2012. « The 'F-words' in Childhood Disability: I Swear This Is How We Should Think! ». *Child: Care, Health and Development* 38 (4): 457-63.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2214.2011.01338.x>.
- Saavedra, Sandra L. 2015. « Segmental Contributions to Trunk Control in Children With Moderate-to-Severe Cerebral Palsy ». *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, Archive of Physical Medicine and Rehabilitation*, 96 (6): 1088-97. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2015.01.016>.
- Saether, Rannei, Jorunn L. Helbostad, Ingrid I. Riphagen, et Torstein Vik. 2013. « Clinical tools to assess balance in children and adults with cerebral palsy: a systematic review ». *Developmental Medicine & Child Neurology* 55 (11): 988-99.
- Saxena, Shikha, Bhamini K. Rao, et Senthil Kumaran. 2014. « Analysis of Postural Stability in Children with Cerebral Palsy and Children with Typical Development: An Observational Study ». *Pediatric Physical Therapy: The Official Publication of the Section on Pediatrics of the American Physical Therapy Association* 26 (3): 325-30.  
<https://doi.org/10.1097/PEP.0000000000000060>.
- Schwesig, René, Stephan Becker, et David Fischer. 2014. « Intraobserver reliability of posturography in healthy subjects ». *Somatosensory & Motor Research* 31 (1): 16-22.  
<https://doi.org/10.3109/08990220.2013.819797>.

- Sherrington, Charles. 1907. « The Integrative Action of the Nervous System. » *The Journal of Nervous and Mental Disease* 34 (12): 801-2.  
[https://journals.lww.com/jonmd/Citation/1907/34120/The\\_Integrative\\_Action\\_of\\_the\\_Nervous\\_System.21.aspx](https://journals.lww.com/jonmd/Citation/1907/34120/The_Integrative_Action_of_the_Nervous_System.21.aspx).
- Stannard, Jennifer Yasu. 2007. « Test-Retest Reliability of Computerized Dynamic Posturography in Children with and without Cerebral Palsy (Pp. 40-46) », n° 1.
- Stribling, Kate, et Jennifer Christy. 2017. « Creative Dance Practice Improves Postural Control in a Child With Cerebral Palsy ». *Pediatric Physical Therapy: The Official Publication of the Section on Pediatrics of the American Physical Therapy Association* 29 (4): 365-69.  
<https://doi.org/10.1097/PEP.0000000000000450>.
- Suk, Min-Hwa, In-Kyeong Park, Soojin Yoo, et Jeong-Yi Kwon. 2021. « The Association between Motor Capacity and Motor Performance in School-Aged Children with Cerebral Palsy: An Observational Study ». *Journal of Exercise Science & Fitness* 19 (4): 223-28.  
<https://doi.org/10.1016/j.jesf.2021.07.002>.
- Ting, Lena H., Hillel J. Chiel, Randy D. Trumbower, Jessica L. Allen, J. Lucas McKay, Madeleine E. Hackney, et Trisha M. Kesar. 2015. « Neuromechanical Principles Underlying Movement Modularity and Their Implications for Rehabilitation ». *Neuron* 86 (1): 38-54.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.02.042>.
- Visser, Jasper E., Mark G. Carpenter, Herman van der Kooij, et Bastiaan R. Bloem. 2008. « The clinical utility of posturography ». *Clinical neurophysiology* 119 (11): 2424-36.
- Wallard, L. 2014. « Balance Control in Gait Children with Cerebral Palsy ». *Gait & Posture*, Gait and Posture, 40 (1): 43-47. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2014.02.009>.
- Wallard, L., B. Bril, G. Dietrich, Y. Kerlirzin, et J. Bredin. 2012. « The Role of Head Stabilization in Locomotion in Children with Cerebral Palsy ». *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine* 55 (9-10): 590-600. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2012.10.004>.
- Yi, Sook-Hee, Ji Hye Hwang, Sang Jun Kim, et Jeong-Yi Kwon. 2012. « Validity of Pediatric Balance Scales in Children with Spastic Cerebral Palsy ». *Neuropediatrics* 43 (6): 307-13.  
<https://doi.org/10.1055/s-0032-1327774>.
- Zammit, Gerard V., Hylton B. Menz, et Shannon E. Munteanu. 2010. « Reliability of the TekScan MatScan(R) System for the Measurement of Plantar Forces and Pressures during Barefoot Level Walking in Healthy Adults ». *Journal of Foot and Ankle Research* 3 (juin): 11.  
<https://doi.org/10.1186/1757-1146-3-11>.

### 3.3 Etude 3 : Les traitements neuro-orthopédiques dispensés aux enfants présentant une Paralyse Cérébrale de type spastique sont-ils des déterminants de leurs capacités fonctionnelles d'équilibration ?

#### 3.3.1 Introduction

La PC de type spastique résulte d'une lésion précoce de la voie pyramidale au niveau de l'aire motrice primaire du cortex cérébral. Le syndrome pyramidal qui en découle associe hypertonie spastique, faiblesse musculaire et troubles de la commande musculaire (Patel et al. 2020; Bar-On et al. 2015; Sheean 2002). Chez les enfants présentant une PC de type spastique, les troubles neurologiques associés à la triade pyramidale entravent le développement neuro-moteur. Associé à la croissance musculo-squelettique, ils sont aussi responsables de l'apparition de troubles musculo-squelettiques secondaires (rétractions musculaires, limitation d'amplitudes articulaires, troubles architecturaux osseux) (D. Graham, Paget, et Wimalasundera 2019; Garrido-Ardila et al. 2021; H. K. Graham et al. 2021). Ces enfants se voient alors proposer différents traitements afin d'améliorer leurs capacités motrices et de limiter l'apparition et l'aggravation des troubles musculo-squelettiques secondaires : on peut ainsi citer les postures d'allongement musculaires (par appareillages de posture, ou séries de plâtres d'allongements), les traitements oraux ou intra-musculaires antispastiques ou encore la neuro-chirurgie et la chirurgie orthopédique (Blumetti et al. 2019; Brandenburg, Rabatin, et Driscoll 2023; Novak et al. 2020; Patel et al. 2020).

L'articulation talo-crurale est atteinte chez une grande majorité enfants avec PC spastique, quels que soient la topographie de l'atteinte et le GMFCS (A. Ebrahimi et al. 2022; Davids 2010). A ce niveau anatomique, le syndrome pyramidal se caractérise le plus communément par une hypertonie du triceps sural, une faiblesse musculaire prédominante aux muscles releveurs du pied, et des troubles de la commande musculaire. Il en résulte non seulement des troubles moteurs fonctionnels (troubles de l'équilibre en station debout, altérations des capacités de marche, restrictions dans la participation aux AVQ...) mais aussi des troubles musculo-squelettiques secondaires. Les injections de Toxine Botulinique A (BoTx-A) et les séries de bottes plâtrées d'allongement musculaire sont fréquemment proposés en pratique clinique quotidienne concernant l'hypertonie et la rétraction des muscles triceps suraux (Walhain et al. 2021; Jiang et al. 2023; Nahm et al. 2018).

- ✓ En cas de spasticité des Triceps Suraux sans rétractions musculaires associées : injections de BoTx-A

La Toxine Botulinique de type A est un agent neuromusculaire bloquant, qui inhibe la libération d'Acétylcholine, provoque une altération de la transmission neuromusculaire et entraîne une parésie musculaire temporaire et localisée. Actuellement ce type de traitement est largement prescrit dans le cadre du traitement de la spasticité des membres chez les enfants à partir de l'âge de 2 ans. Des recommandations générales et des déclarations de consensus sur l'utilisation clinique et les techniques d'injection de BoTx-A sont publiées dans la littérature internationale (H. K. Graham et al. 2016; Nahm et al. 2018a; Jiang et al. 2023; Mirska et al. 2014; Multani et al. 2019; Sättilä 2020).

Les indications d'injections de BoTx-A aux triceps suraux chez les enfants avec PC sont le plus souvent fonctionnelles : faciliter les acquisitions neuro-motrices et les déplacements (Basu et al. 2015), améliorer le schéma de marche (Liu et al. 2014, De Niet et al. 2015, Chambers et al. 2001) et plus particulièrement éviter de l'équin dynamique (Švehlík et al. 2010; Tilton et al. 2017). Elles peuvent aussi avoir comme objectifs de diminuer les douleurs liées à la spasticité (Tedesco, Martins, et Nicolini-Panisson 2014), de ralentir et/ou limiter la dégradation orthopédique (Molenaers et al. 2010) ou encore de faciliter la tolérance aux attelles suro-pédieuses de posture et d'aide à la déambulation.



Dans leur récente revue de la littérature, Jiang et al. mettent en évidence les effets bénéfiques du traitement par injections de BoTx-A. Ce traitement permet de réduire efficacement le tonus musculaire, d'augmenter la mobilité articulaire passive et active de la cheville, d'améliorer la fonction motrice globale et de favoriser l'amélioration du schéma de marche chez les patients atteints de paralysie cérébrale. Les avantages de ce traitement sont constatés dès 3 à 4 semaines après l'injection et peuvent perdurer pendant une durée de 3 à 6 mois. De plus, les améliorations des capacités motrices peuvent persister jusqu'à 1 an. (Jiang et al. 2023; Multani et al. 2019; De Pieri et al. 2020; H. Kim et Kolaski 2021).

- ✓ En cas de rétraction des Triceps Suraux sans spasticité invalidante sur le plan fonctionnel associée : séries de bottes plâtrées d'allongement musculaire

Les séries de bottes plâtrées d'allongements musculaires sont une méthode utilisée pour étirer progressivement les Triceps Suraux, en favorisant l'augmentation du nombre de sarcomères en série et le remodelage des enveloppes conjonctives. Cette approche permet d'accroître l'amplitude de flexion dorsale de la cheville, que ce soit en conditions de genou fléchi ou de genou tendu. Les plâtres successifs d'allongement des Triceps Suraux sont considérés comme une technique simple, non invasive, efficace et économique pour traiter les rétractions des muscles gastrocnémiens et soléaires. Toutefois, il est important de noter qu'il existe un risque élevé de récurrence des rétractions musculaires avec la croissance osseuse. (N. Peeters et al. 2018; Nicky Peeters et al. 2020; Novak et al. 2020; Tustin et Patel 2015; Milne, Miao, et Beattie 2020).

- ✓ En cas de spasticité associée à une rétraction des Triceps Suraux : injections de BoTx-A suivies de séries de bottes plâtrées d'allongement musculaire

Les injections BoTx-A aux Triceps Suraux sont fréquemment associées à des bottes plâtrées d'allongement musculaires réalisées 3 à 4 semaines après les injections, moment du pic d'action des Toxines. Ce type de protocole permet d'optimiser l'allongement musculaire grâce à l'action des Toxines, mais aussi d'améliorer l'efficacité globale des injections de BoTx-A (Dursun et al. 2017; Newman et al. 2007; Jiang et al. 2023; H. K. Graham et al. 2021; Kelly et al. 2019).

L'impact de ces traitements neuro-orthopédiques sur la marche a fait l'objet de nombreuses études (Galey et al. 2017; Klaewkasikum et al. 2022; Nicky Peeters et al. 2022; Multani et al. 2019; Jiang et al. 2023). Par contre très peu d'études ont évalué la répercussion de l'injection de BoTx-A et/ou les séries de bottes plâtrées d'allongements musculaires sur la fonction d'équilibration et le contrôle posturale (Park et al. 2010a; Afnan et al. 2023).

L'objectif de cette étude est alors d'évaluer l'impact des injections de BoTx-A aux triceps suraux et/ou bottes plâtrées d'allongements musculaires sur les capacités fonctionnelles d'équilibration et les paramètres posturographiques d'enfants présentant une PC spastique.

### 3.3.2 Population, matériel et méthode

Les considérations éthiques, ainsi que les modalités de recrutement, d'information et de recueil du consentement éclairé des patients/de leurs parents accompagnants sont décrites dans la partie « 2.2.1 Considérations éthiques ».

#### 3.3.2.1 Population

##### 3.3.2.1.1 Critères d'inclusion et d'exclusion

Sont inclus dans cette étude de cas des enfants de 5 à 12 ans révolus pour lesquels un diagnostic de PC a été posé, à l'exclusion de toute autre pathologie neurologique congénitale dégénérative ou acquise. Les enfants inclus sont déambulants, avec un GMFCS de I ou II. Le tableau neurologique peut être de type spastique pure ou mixte, la topographie de l'atteinte bilatérale (diparésie, quadriparésie) ou unilatérale (monoparésie, hémiparésie).

Les enfants présentant une PC de type dystonique ou dyskinétique, ceux souffrant d'une épilepsie non contrôlée, ainsi que ceux ayant une pathologie concomitante grave qui n'est pas habituellement associée à la PC, ne sont pas inclus dans cette étude. De plus, les enfants avec un diagnostic de déficience visuelle et/ou auditive non appareillée(s) ou de dysfonctionnement vestibulaire connu ne sont pas inclus. Les enfants présentant des troubles cognitifs et/ou comportementaux qui compromettent leur compréhension des instructions de passation de la Pediatric Balance Scale et des consignes d'évaluations posturographiques ont également été exclus de l'étude. Les critères d'exclusion de l'étude comprennent également la non-signature du formulaire de consentement éclairé par le parent accompagnant et toute évaluation qui n'a pas été finalisée.

##### 3.3.2.1.2 Description de la population étudiée

La population étudiée est composée de 8 enfants, 3 filles et 5 garçons, âgés en moyenne de 8,8 ans (âges compris entre 5,9 et 11,4 ans). Ils présentent tous une PC de type spastique, pure ou mixte. Parmi eux, 2 présentent un GMFCS I et 6 présentent un GMFCS II (Tableau 3.3-1).

Ces 8 enfants sont répartis en trois sous-populations d'étude, en fonction du traitement neuro-orthopédique dont ils ont bénéficié :

- Les patients A, B, C : Injections de BoTx-A dans les triceps suraux seules
- Les patients D, E, F : Série de plâtres d'allongements musculaire des triceps suraux seuls
- Les patients G et H : Injections de BoTx-A + Série de plâtres d'allongements musculaire des triceps suraux

	N	Sexe	Age Moyenne (min-max)	GMFCS	Topographie de l'atteinte
<b>Population Totale</b>	8	♀ : 3 ♂ : 5	8,8 (5,9-11,4)	I : 2 II : 6	Unilatérale : 5 Bilatérale : 3
<b>Pré/Post BoTx-A</b>	3 Patients A B C	♀ : 1 ♂ : 2	9,3 (5,9-11,4)	I : 1 II : 2	Unilatérale : 2 Bilatérale : 1
<b>Pré/Post Plâtres</b>	3 Patients D E F	♀ : 1 ♂ : 2	8,0 (6,0-11,1)	I : 1 II : 2	Unilatérale : 2 Bilatérale : 1
<b>Pré/Post BoTx-A + Plâtres</b>	2 Patients G H	♀ : 1 ♂ : 1	8,7 (5,9-11,4)	I : 0 II : 2	Unilatérale : 1 Bilatérale : 1

Tableau 3.3-1 : Description de la population étudiée

### 3.3.2.2 Matériel

Les mesures goniométriques des amplitudes articulaires et longueurs musculaires, l'évaluation de la spasticité avec la Modified Ashworth Scale, l'évaluation des capacités fonctionnelles d'équilibration à l'aide de la Pediatric Balance Scale, ainsi que la mesure des paramètres posturographiques en position statique debout grâce au tapis de pression matricielle MatScan sont décrites dans la partie « 3.3 Méthodologie générale ».

### 3.3.2.3 Méthode

#### 3.3.2.3.1 Modalités d'injections de Toxine Botulinique de type A et de confection de bottes plâtrées d'allongements musculaires des triceps suraux

Les modalités d'injections de BoTx-A (indications, prémédication, repérage échographique des muscles concernés, sites et doses d'injections) et de confection de bottes plâtrées d'allongements musculaires des triceps suraux, sont conformes :

- aux protocoles en vigueur au sein de l'Unité Fonctionnelle d'Analyse du Mouvement des Hôpitaux de Saint-Maurice (94, France)
- aux recommandations internationales issues de la littérature scientifique (H. K. Graham et al. 2000; Nahm et al. 2018b; Novak et al. 2020; Multani et al. 2019; Blumetti et al. 2019; Sättilä 2020)

#### 3.3.2.3.2 Calendrier de l'étude

Les patients A, B et C ayant bénéficié d'une injection de BoTx-A seule sont évalués à S0 (juste avant l'injection) puis à S4 (quatre semaines après l'injection).

Les patients D, E et F ayant bénéficié d'une série de bottes plâtrées d'allongements musculaires des triceps suraux sont évalués à S0 (juste avant la confection du/des botte(s) plâtrée(s)) , puis à S3(après l'ablation de la 3ème et dernière série de botte(s) plâtrée(s)).

Les patients G et H ayant bénéficié d'une injection de BoTx-A + d'une série de bottes plâtrées d'allongements musculaires des triceps suraux sont évalués à S0 (juste avant l'injection) puis à S7 (après l'ablation de la 3ème et dernière série de botte(s) plâtrée(s)) (Figure 3.3-1).

Semaines		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
<b>Patients A, B, C (pré/post Toxines)</b>	Ei					Ef		
<b>Patients D, E, F (pré/post Plâtres)</b>	Ei	P1	P2	P3	Ef			
<b>Patients G, H (pré/post Toxines + Plâtres)</b>	Ei					P1	P2	P3   Ef

*Ei : Evaluation Initiale ; Ef : Evaluation Finale ; P1 à P3 : Plâtres 1 à 3*

Figure 3.3-1 : Calendrier de l'étude

#### 3.3.2.3.3 Objectifs de recherche et critères d'évaluation

- ✓ Objectif de recherche principal

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'impact sur les capacités fonctionnelles d'équilibration des traitements neuro-orthopédiques aux triceps suraux (BoTx-A et/ou séries de bottes plâtrées

d'allongement musculaire) chez des enfants de 5 à 12 ans présentant une PC de type spastique, GMFCS I ou II.

✓ Critères d'évaluation principaux

Les capacités fonctionnelles d'équilibration des enfants inclus dans l'étude sont évaluées à l'aide de la Pediatric Balance Scale (PBS). Cette échelle constituée de 14 items, peut être divisée en deux sous-scores : la PBS statique composée des items 4 à 9, et la PBS dynamique, composée des items 1 à 3 et 10 à 14 (Darr et al. 2015; Shim et al. 2022).

Les scores de PBS en pré et post traitements neuro-orthopédiques sont pondérés grâce aux notions de différence Changement Minimal Détectable (« Minimal Detectable Change » MDC) et de Différence Minimale Cliniquement Importante (« Minimal Clinically Important Difference » MCID). Le MDC représente une estimation statistique de la plus petite quantité de changement qui peut être détectée par une mesure qui correspond à un changement notable de capacité. Le MDC est le montant minimum de changement dans le score d'un patient qui garantit que le changement n'est pas le résultat d'une erreur de mesure. La MCID quant à elle représente la plus petite quantité de changement dans un résultat qui pourrait être considéré comme important par le patient ou le clinicien. Le MCID indique donc la quantité minimale de changement requise pour que le patient ressente une différence dans la variable que vous mesurez (Jaeschke, Singer, et Guyatt 1989; Bloom et al. 2023).

Chen et al. ont établi le MDC et la MCID pour la variable PBS et ses sous-scores (C. Chen 2013), tel que décrit dans le Tableau 3.3-2.

Minimal Detectable Change (MDC)	PBS total = 1,59 points PBS statique = 0,79 point PBS dynamique = 0,96 point
Minimally Clinically Important Difference (MCID)	PBS total = 5,83 points PBS statique = 2,92 points PBS dynamique = 2,92 points

Tableau 3.3-2 : Minimal Detectable Change (MDC) et Minimally Clinically Important Difference (MCID) pour la Pediatric Balance Scale et ses sous-scores (C. Chen 2013)

✓ Objectif de recherche secondaire

L'objectif secondaire de cette étude est d'évaluer l'impact sur les paramètres posturographiques en position quasi-statique debout et yeux ouverts et des traitements neuro-orthopédiques aux triceps suraux (BoTx-A et/ou séries de bottes plâtrées d'allongement musculaire) chez des enfants de 5 à 12 ans présentant une PC de type spastique, GMFCS I ou II.

✓ Critères d'évaluation secondaires

L'asymétrie d'appui entre les MI D et G, et les paramètres posturaux étudiés (longueur statokinésigramme et la surface de l'ellipse de confiance) sont décrits dans la partie « 3.3 Méthodologie générale ».

### 3.3.3 Résultats

#### 3.3.3.1 Pré/Post Injections de Toxine Botulinique de type A

Concernant l'étude en pré et post injections de BoTx-A, l'ensemble des changements observés ont été dans le sens d'une diminution du PBS, et donc d'une régression des capacités fonctionnelles d'équilibration. Pour le patient A, les variations des scores de PBS total et de PBS statique sont supérieures au seuil de MDC. La variation de score de PBS dynamique est supérieure au seuil de MCID. Aucune modification de PBS total, statique ou dynamique n'est notée pour le patient B. Pour le patient C, la variation de score de PBS dynamique est supérieure au seuil MDC, alors que les scores de PBS total et statique ne sont pas modifiés (Figure 3.3-2).

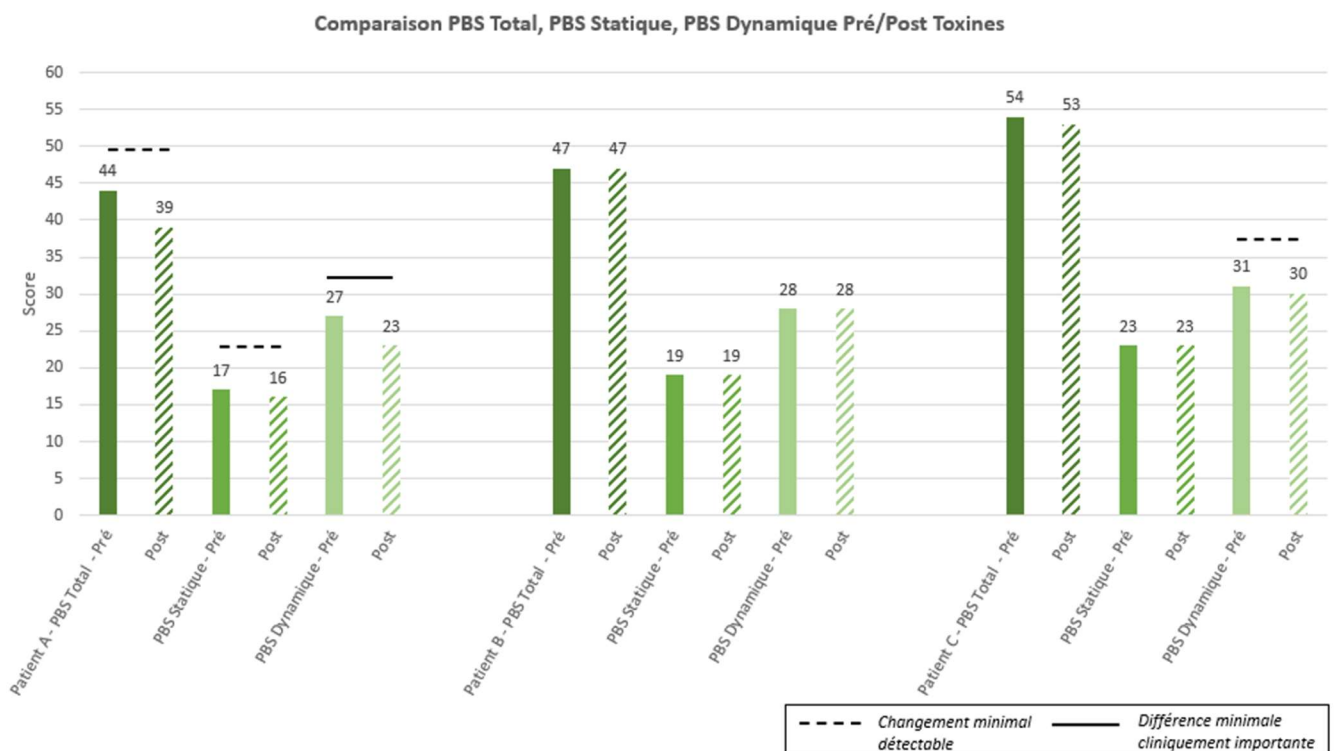
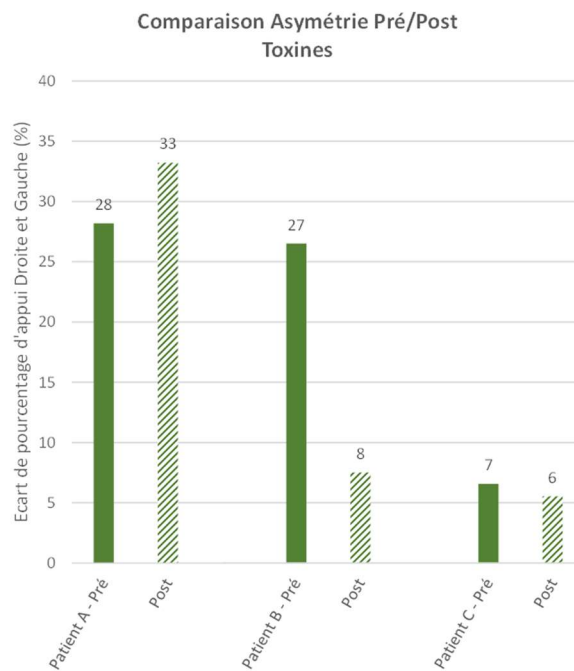
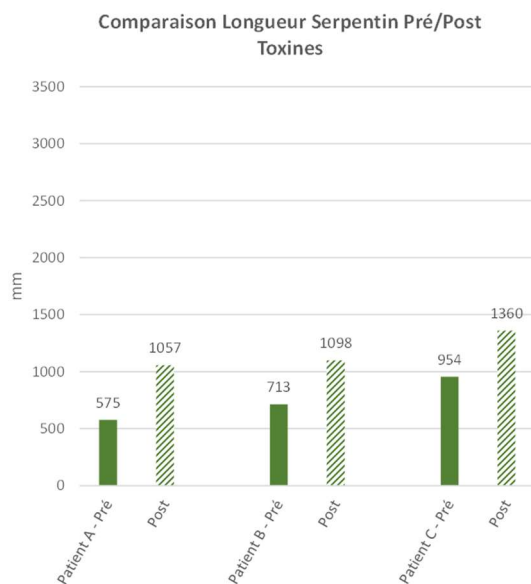


Figure 3.3-2 : Comparaison PBS Total, PBS Statique et PB Dynamique Pré/Post BoTx-A

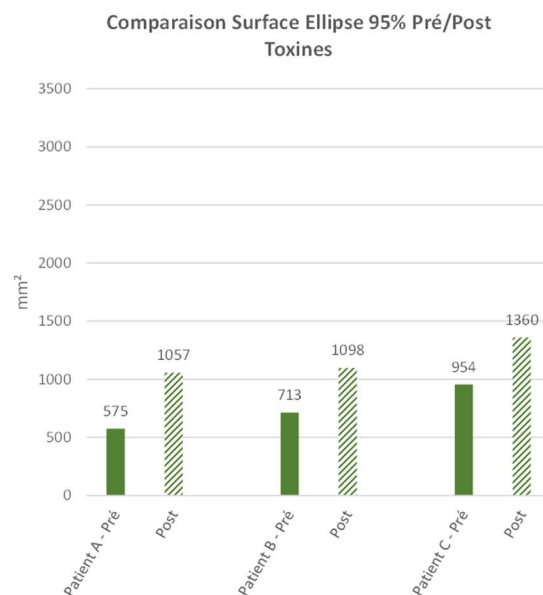
L'asymétrie d'appui tend à augmenter pour le patient A, alors qu'elle tend à diminuer chez les patients B et C (Figure 3.3-3A). Enfin concernant les paramètres posturographiques, les longueurs de statokinésigramme (mm) et la surface de l'ellipse de confiance à 95% (mm<sup>2</sup>) tendent à augmenter chez les 3 patients étudiés (Figures 3.3-3 A et B).



**Figure 3.3-3A : Comparaison Asymétrie Pré/Post BoTx-A**



**Figure 3.3-3B : Comparaison Longueur du statokinésigramme Pré/Post BoTx-A**



**Figure 3.3-3C : Comparaison de la surface de l'ellipse de confiance à 95% Pré/Post BoTx-A**

### 3.3.3.2 Pré/Post Séries de bottes plâtrées d'allongements musculaire des triceps suraux

Concernant l'étude en pré et post bottes plâtrées d'allongements musculaire des triceps suraux, l'ensemble des changements observés ont été dans le sens d'une diminution du PBS et donc d'une régression des capacités fonctionnelles d'équilibration.

Pour le patient D, les variations des scores de PBS total, statique et dynamique sont supérieures au seuil de MDC, dans le sens d'une amélioration su score de PBS et donc d'une amélioration des capacités fonctionnelles d'équilibration. Aucune modification de PBS total, statique ou dynamique n'est notée pour le patient E. Enfin pour le patient F, les scores de PBS total et statique ont augmenté en dépassant le seuil de MDC, alors que le score de PBS dynamique a diminué en dépassant le seuil de MDC (Figure 3.3-4).

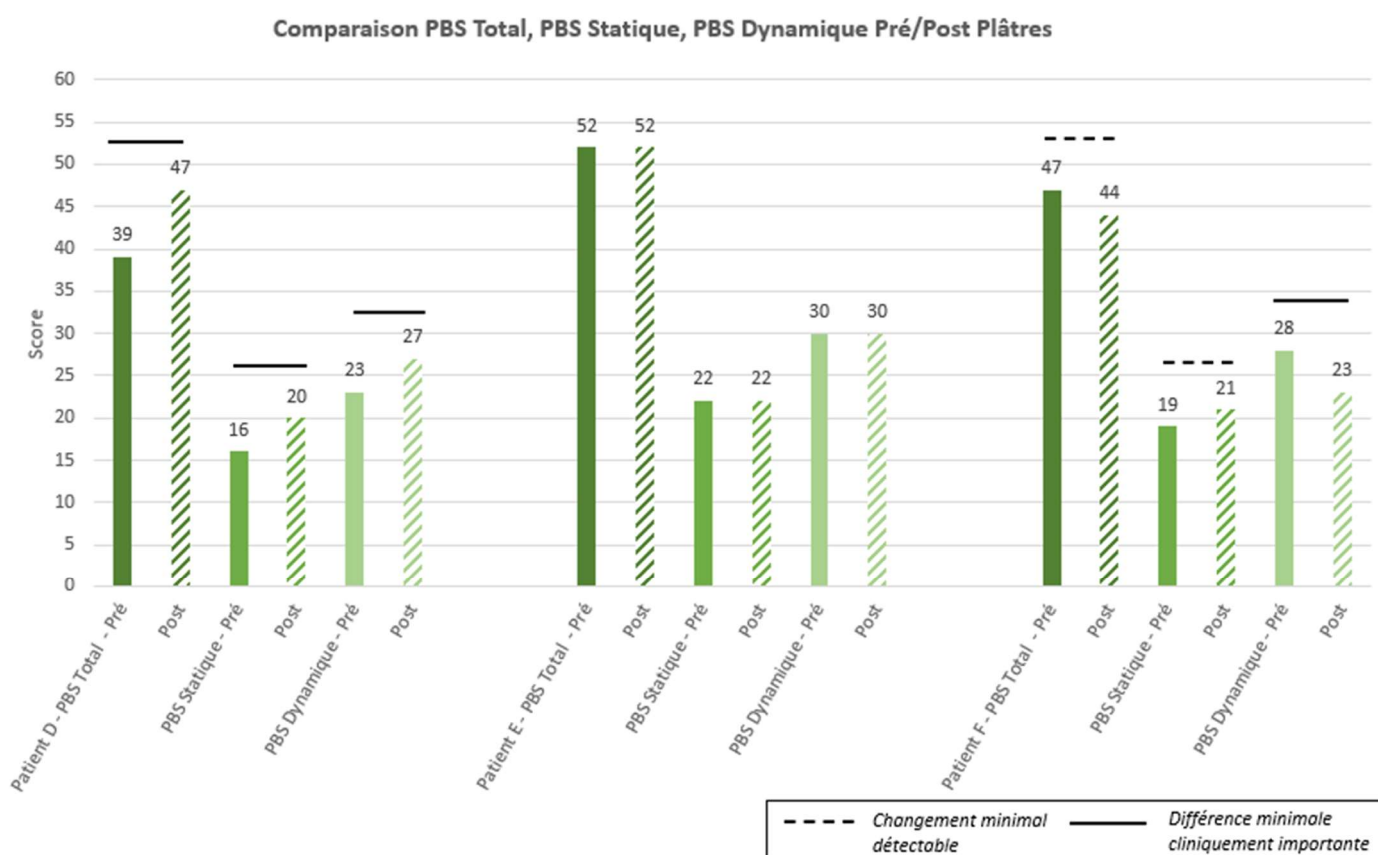


Figure 3.3-4 : Comparaison PBS Total, PBS Statique et PBS Dynamique Pré/Post BoTx-A

L'asymétrie d'appui tend à diminuer pour le patient D, alors qu'elle tend à augmenter pour le patient F (Figure 3.3-5A). Enfin concernant les paramètres posturographiques, les longueurs de statokinésigramme (mm) et la surface de l'ellipse de confiance à 95% (mm<sup>2</sup>) tendent à diminuer chez le patient D, alors qu'elles tendent à augmenter chez les patients E et F (Figures 3.3-5 B et C).

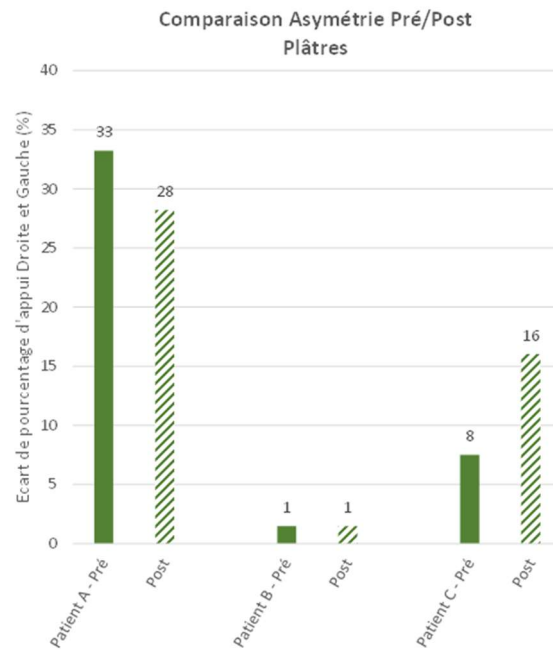


Figure 3.3-5A : Comparaison Asymétrie Pré/Post Plâtres

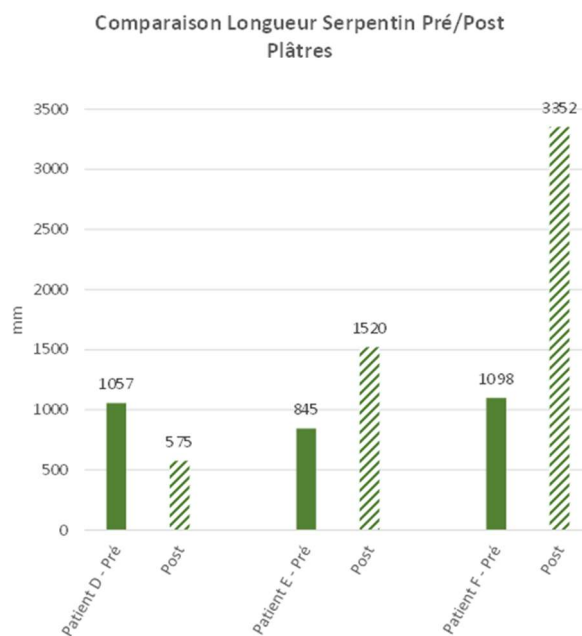


Figure 3.3-5B : Comparaison Longueur du statokinésigramme Pré/Post Plâtres

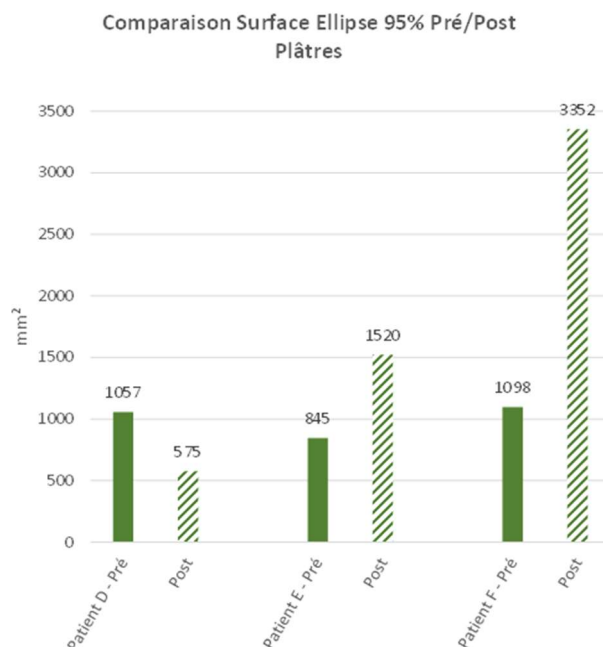


Figure 3.3-5C : Comparaison de la surface de l'ellipse de confiance à 95% Pré/Post Plâtres



### 3.3.3.3 Pré/Post Injections de Toxine Botulinique de type A + Séries de bottes plâtrées d'allongements musculaire des triceps suraux

Concernant les scores de PBS en pré et post injections de BoTx-A + Séries de bottes plâtrées d'allongements musculaire des triceps suraux, on observe pour le patient G une augmentation du score de PBS total score total de PBS supérieure au seuil de changement minimal détectable (MDC), et une augmentation du score de PBS Statique supérieure au seuil de Différence minimale cliniquement importante (MCID). Pour le patient H, le score de PBS total diminue avec une variation dépassant le seuil de changement minimal détectable (MDC), le score de PBS statique augmente avec une variation dépassant le seuil de changement minimal détectable (MDC), et le score de PBS Dynamique augmente avec une variation dépassant le seuil de Différence minimale cliniquement importante (MCID) (Figure 3.3-6).

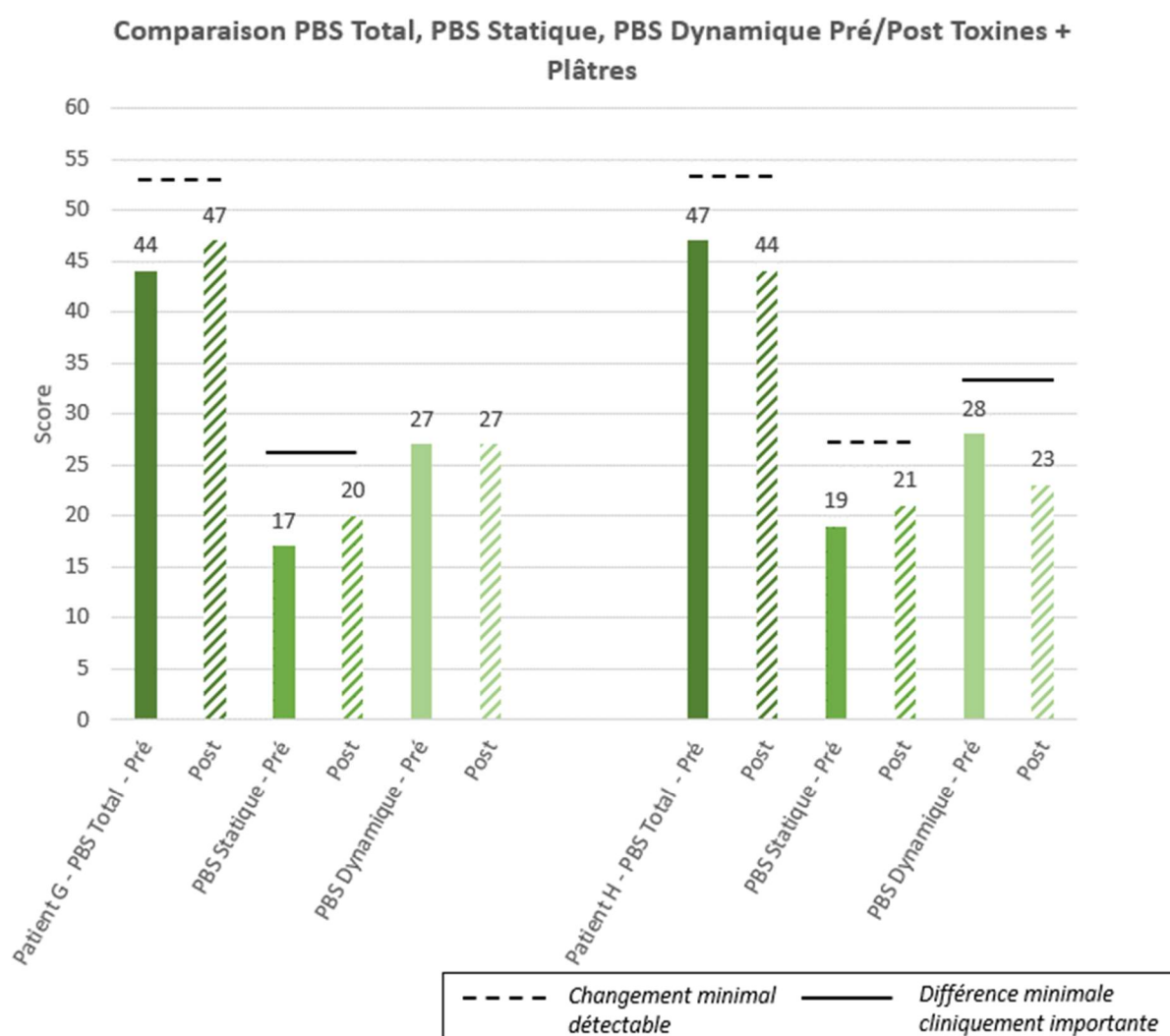


Figure 3.3-6 : Comparaison PBS Total, PBS Statique et PB Dynamique Pré/Post BoTx-A + Plâtres

L'asymétrie d'appui entre les MI reste identique pour le patient G, alors qu'elle tend à diminuer pour le patient H (Figure 3.3-7A). Enfin concernant les paramètres posturographiques, les longueurs de statokinésigramme (mm) et la surface de l'ellipse de confiance à 95% (mm<sup>2</sup>) tendent à augmenter chez les patients G et H (Figure 3.3-7 B et C).

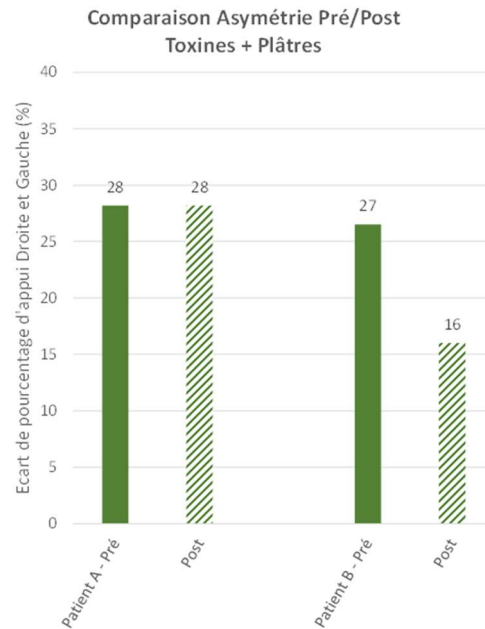


Figure 3.3-7A : Comparaison Asymétrie Pré/Post BoTx-A + Plâtres

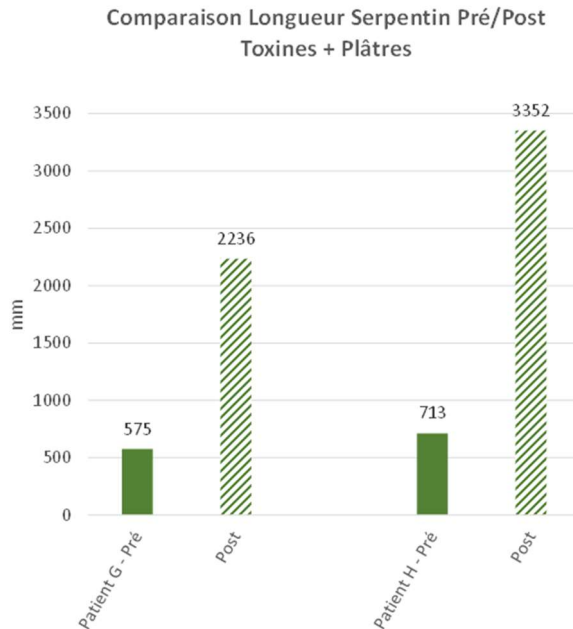


Figure 3.3-7B : Comparaison Longueur du statokinésigramme Pré/Post BoTx-A + Plâtres

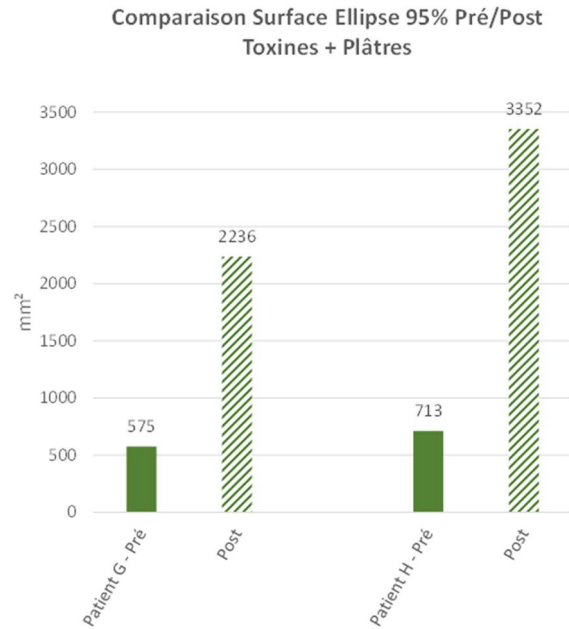


Figure 3.3-7AC: Comparaison de la surface de l'ellipse de confiance à 95% Pré/Post BoTx-A + Plâtres

### 3.3.4 Discussion

#### 3.3.4.1 Synthèse des résultats

Pour les patients A, B et C (pré/post BoTx-A), dont le PBS a été évalué juste avant injections de BoTx-A dans les Triceps Suraux et à S4, on observe soit une diminution globale de leurs scores de PBS total, statique et dynamique, soit aucune modification de ces scores. Cela témoigne d'une diminution globale de leurs capacités d'équilibration fonctionnelles (Figure 3.3-8). Concernant les patients D, E et F (pré/post Plâtres) ainsi que G et H (pré/post BoTx-A + Plâtres), ils présentent, en fonction du patient, des variations diverses des scores de PBS total, statique et dynamique. En effet, certains d'entre eux (les patients D et G) ont amélioré leurs capacités fonctionnelles d'équilibration en pré/post traitement neuro-orthopédique. Par contre, on observe pour les patients F et H une diminution du score de PBS dynamique dépassant le seuil de MCID, simultanément avec une augmentation dépassant le seuil de MDC de leurs scores de PBS statique (Figure 3.3-8).

Pré/Post Toxines	Patient A	Patient B	Patient C
PBS Total	↘	=	=
PBS Statique	↘	=	=
PBS Dynamique	↘	=	↘

Pré/Post Plâtres	Patient D	Patient E	Patient F
PBS Total	↗	=	↘
PBS Statique	↗	=	↗
PBS Dynamique	↗	=	↘

Pré/Post Toxines + Plâtres	Patient G	Patient H	
PBS Total	↗	↘	
PBS Statique	↗	↗	
PBS Dynamique	=	↘	

*Les cases sur fond vert (resp. rouge) indiquent une amélioration (resp. diminution) des capacités fonctionnelles d'équilibration*

Augmentation du PBS dépassant le seuil de MCID	↗
Augmentation du PBS dépassant le seuil de MDC	↗
Diminution du PBS dépassant le seuil de MCID	↘
Diminution du PBS dépassant le seuil de MDC	↘

Figure 3.3-8 : Synthèse des résultats de l'étude 3 concernant le PBS

On observe une tendance à la diminution de l'asymétrie de répartition du poids entre les MI G et D pour 4 patients sur 7 (patients B, C, D et H) entre les évaluations pré et post traitements neuro-orthopédiques. Par contre, celle-ci tend à augmenter pour 2 patients sur 7 (patients A et F) (Figure 3.3-9).

Enfin concernant les paramètres posturographiques pris en compte (longueur du statokinésigramme et Surface de l'ellipse de confiance à 95%), on observe une tendance à l'augmentation des déplacements du CdP pour 6 patients sur 7 (A, B, C, E, F, G et H), indiquant une dégradation de leurs paramètres posturographiques entre leurs évaluations pré et post traitements neuro-orthopédiques (Figure 3.3-9).

Pré/Post Toxines	Patient A	Patient B	Patient C
Asymétrie	↗	↘	↘
Longueur Serpentin	↗	↗	↗
Surface Ellipse	↗	↗	↗

Pré/Post Plâtres	Patient D	Patient E	Patient F
Asymétrie	↘	=	↗
Longueur Serpentin	↘	↗	↗
Surface Ellipse	↘	↗	↗

Pré/Post Toxines + Plâtres	Patient G	Patient H	
Asymétrie	=	↘	
Longueur Serpentin	↗	↗	
Surface Ellipse	↗	↗	

Les cases sur fond vert (resp. rouge) indiquent une amélioration (resp. diminution) des capacités fonctionnelles d'équilibration

Augmentation du paramètre ↗  
Diminution du paramètre ↘

Figure 3.3-9 : Synthèse des résultats de l'étude 3 concernant les paramètres posturographiques

### 3.3.4.2 Comparaison des résultats à la littérature

#### 3.3.4.2.1 Impact des traitements neuro-orthopédiques aux triceps suraux sur les PBS et ses sous-scores

Les résultats de notre étude de cas suggèrent que les injections de BoTx-A dans les triceps suraux chez des enfants de 5 à 12 ans présentant une PC de type spastique ont un effet négatif sur les capacités fonctionnelles d'équilibration mesurées par la PBS. En revanche, les séries de bottes plâtrées d'allongements musculaires ainsi que l'association d'injections de BoTx-A dans les triceps suraux et de bottes plâtrées d'allongements musculaires semblent avoir tendance à améliorer les scores et sous-scores de la PBS.

Ces résultats sont cohérents avec ceux de l'étude menée par Park et al., qui a examiné une population de 38 enfants atteints de PC de type spastique, classés GMFCS de niveau I à III. Leur étude a montré que les injections de BoTx-A dans les triceps suraux seules n'ont pas entraîné d'amélioration significative de la motricité fonctionnelle en position debout, évaluée par l'EMFG-66 partie D. En revanche, l'association d'injections de BoTx-A dans les triceps suraux et de bottes plâtrées d'allongement musculaire a entraîné une amélioration significative de la motricité fonctionnelle en position debout, évaluée par l'EMFG-66 partie D (Park et al. 2010b). Récemment, Afnan et al. ont également observé une corrélation significative et positive entre la force des muscles des membres inférieurs et les capacités fonctionnelles d'équilibration mesurées à l'aide du PBS, dans une population de 83 enfants atteints de PC de 4 à 12 ans présentant une diparésie spastique. Ce résultat est en accord avec notre constat de diminution des scores du PBS suite aux injections de BoTx-A dans les triceps suraux, étant donné que la Toxine botulinique a un effet paralysant sur les muscles traités. Dans cette même étude, les auteurs ont décrit une corrélation significative et négative entre la rétraction des muscles des membres inférieurs et le score du PBS. Une fois de plus, ce résultat est en accord avec notre observation d'une augmentation des scores du PBS suite à l'utilisation de bottes plâtrées d'allongement musculaire, qui permettent de réduire la rétraction des muscles triceps suraux (Afnan et al. 2023).

Par contre, dans une étude menée par Zhu et al. sur une population de 107 enfants atteints de PC de type spastique marchant sur la pointe des pieds, les injections de BoTx-A dans les triceps suraux ont montré une amélioration significative de la motricité globale, évaluée à l'aide de l'EMFG-88, ainsi que des capacités fonctionnelles d'équilibration mesurées par le PBS. (Zhu et al. 2020).

#### 3.3.4.2.2 Impact des traitements neuro-orthopédiques aux triceps suraux sur l'asymétrie de répartition du poids du corps entre les membres inférieurs

Dans une étude menée par Domagalska et al., l'asymétrie de répartition du poids du corps entre les membres inférieurs chez les enfants atteints de Paralysie Cérébrale (PC) unilatérale ou bilatérale a été étudiée. Deux schémas posturaux différents ont été identifiés : le schéma postural progravitationnel, observé chez les enfants ayant une tendance à augmenter l'appui du côté le plus atteint, et le schéma postural antigravitationnel, caractéristique des enfants ayant une tendance à diminuer l'appui du côté le plus atteint. Chez les enfants atteints de PC unilatérale, il a été observé que le schéma postural antigravitationnel est associé à un contrôle postural moins bon que celui observé chez les enfants présentant un schéma postural progravitationnel. (Domagalska-Szopa et Szopa 2017; 2014; 2013)

L'étude de cas présentée ici démontre que les injections de BoTx-A dans les triceps suraux, les séries de bottes plâtrées d'allongements musculaires, ainsi que l'association des deux interventions, chez des enfants âgés de 5 à 12 ans atteints de PC de type spastique, qu'elle soit unilatérale ou bilatérale, ont tendance à réduire l'asymétrie d'appui entre leurs membres inférieurs. Ces résultats sont similaires à ceux de l'étude menée par Bourelle et al., qui ont étudié la répartition du poids du corps entre les membres inférieurs chez neuf enfants atteints de PC unilatérale ou bilatérale, avant et après un traitement neuro-orthopédique de leur équie dynamique ou fixé. Les patients ont montré une meilleure symétrie dans la répartition de leur poids du corps en position de squats, à différentes amplitudes de flexion des genoux, avant et après le traitement (Bourelle et al. 2010).

#### 3.3.4.2.3 Impact des traitements neuro-orthopédiques aux triceps suraux sur la longueur du statokinésigramme et la surface de l'ellipse de confiance à 95%

Les résultats de notre étude de cas suggèrent que les injections de BoTx-A dans les triceps suraux, les séries de bottes plâtrées d'allongements musculaires, ainsi que l'association d'injections de BoTx-A dans les triceps suraux et bottes plâtrées d'allongements musculaires, chez des enfants de 5 à 12 ans avec PC de type spastique, s'accompagnent d'une tendance à l'augmentation de la longueur du statokinésigramme et de la surface de l'ellipse de confiance. Cela indique une diminution du contrôle postural, représenté par les mouvements du CdP, suite à ces traitements neuro-orthopédiques.

À ce jour, il n'existe pas d'étude dans la littérature évaluant spécifiquement les liens entre la longueur et le tonus des muscles gastrocnémiens et les paramètres posturographiques chez les enfants atteints de PC ou chez les patients spastiques en général. Cependant, dans la population générale, des études ont démontré l'influence significative de l'amplitude articulaire en flexion plantaire de la cheville (talocrurale) sur le contrôle postural statique en position debout. Cette amplitude articulaire est importante pour maintenir l'équilibre et la stabilité du corps lors de la position debout (S.-G. Kim et Kim 2018). D'autres études ont révélé une altération des paramètres posturographiques chez les femmes pendant les périodes d'ovulation et de menstruation, en corrélation avec une augmentation de l'élasticité des muscles de la cheville tels que le gastrocnémien latéral, le long péronier et le tibial antérieur. Cette association entre les fluctuations hormonales et les changements dans la tonicité musculaire peut influencer la stabilité posturale chez certaines femmes à différents stades de leur cycle menstruel. Cependant, il convient de souligner que ces résultats sont spécifiques aux variations

hormonales chez les femmes et ne sont pas directement liés à la Paralyse Cérébrale ou à d'autres conditions neurologiques (Yim, Petrofsky, et Lee 2018).

#### **3.3.4.3 Limites des traitements neuro-orthopédiques aux triceps suraux et perspectives**

Si l'efficacité des bottes plâtrées d'allongement des muscles triceps suraux est sans équivoque pour lutter contre l'apparition et l'aggravation des troubles musculo-squelettiques secondaires, les injections de BoTx-A sont régulièrement remises en question. En effet, leur effet transitoire, ne semble pas entraîner d'améliorations fonctionnelles sur le long terme (Multani et al. 2019). Aussi, les injections de BoTx-A dans les triceps suraux, entraînent des modifications histologique et structurelle des muscles toxinés à court, moyen et long terme (Park et al. 2014; Walhain et al. 2021; Multani et al. 2019; Pitcher et al. 2015).

Aussi, l'efficacité du traitement BoTx-A et plâtres d'allongement chez enfants atteint de PC est influencée par plusieurs facteurs intrinsèques et extrinsèques, tels que la posologie, la répétition des injections et l'âge du patient, mais également les conditions psychologiques de l'enfant et de ses parents (motivation, stress...) (Yap et al. 2010; Pascual-Pascual, Pascual-Castroviejo, et Ruiz 2011; Jiang et al. 2023).

#### **3.3.5 Limites de l'étude**

La principale limitation de cette étude de cas est le faible nombre de participants (n=8), ce qui ne permet pas d'effectuer des analyses statistiques inférentielles ni de différencier les résultats en fonction des caractéristiques cliniques des patients tels que l'âge, la localisation de l'atteinte ou le niveau de fonctionnement selon la classification GMFCS. De plus, une étude longitudinale avec une population plus importante aurait permis de mieux comprendre les effets spécifiques de la diminution de la spasticité versus l'augmentation de la longueur musculaire des triceps suraux sur les scores de PBS et les paramètres posturographiques.

#### **3.3.6 Conclusion et Perspectives**

Il est largement accepté que la spasticité a un impact négatif sur le contrôle postural dans la PC perturbant les réflexes et les réactions posturales d'équilibration. Cependant, peu d'études ont spécifiquement évalué cette relation. Dans une étude portant sur des enfants atteints de paralysie cérébrale spastique, la rhizotomie dorsale sélective a été associée à une amélioration des variables liées au contrôle postural telles que la vitesse du trajet, le déplacement radial et la fréquence du balancement. Cependant, cette étude n'a pas évalué directement l'impact potentiel de la spasticité sur l'équilibre fonctionnel des enfants atteints de paralysie cérébrale (Rumberg et al. 2016).

L'étude de cas présentée suggère que les traitements neuro-orthopédiques seuls ont tendance à perturber les capacités analytiques et fonctionnelles d'équilibration en augmentant certains paramètres posturographiques et les scores de la PBS. Cela suggère que les injections de BoTx-A et/ou les bottes plâtrées d'allongement des triceps suraux pourraient favoriser la liberté de mouvement, mais potentiellement au détriment de la stabilité posturale. En effet, la raideur causée par l'hypertonie musculaire et ses conséquences sur le système musculo-squelettique peut être bénéfique pour compenser le déficit de force musculaire et améliorer la stabilité en position debout. De plus, Wallard et al. décrivent la stratégie posturale des enfants atteints de PC comme étant "en bloc", ce qui signifie qu'ils doivent fournir plus d'efforts pour maintenir leur équilibre par rapport aux enfants au développement normal (Wallard et al. 2014).

De nombreux auteurs soulignent également l'importance d'associer les injections de BoTx-A dans les muscles spastiques à des séances de rééducation neuro-motrice et à l'utilisation d'appareillages (pour la posture et/ou la fonction) afin d'optimiser les bénéfices sur les capacités analytiques et fonctionnelles d'équilibration, et de les maintenir à long terme. Cette approche combinée permet de maximiser les effets du traitement et d'assurer une amélioration durable des capacités d'équilibre et de stabilisation chez les patients atteints de PC. (Degelaen et al. 2013; de Niet et al. 2015; Molenaers et al. 2010; Jiang et al. 2023; Franki et al. 2020; Fonseca et al. 2018; Löwing et al. 2017; Yana et al. 2019). La période d'efficacité de la BoTx-A, qu'elle soit associée ou non à la pose de bottes plâtrées d'allongement musculaire, offre une fenêtre d'environ 6 mois, ce qui crée des conditions favorables à la rééducation neuro-motrice. La réduction de la spasticité au niveau des triceps suraux permet d'améliorer le contrôle moteur et le renforcement des muscles fléchisseurs dorsaux de l'articulation talo-crurale. Cela se traduit non seulement par une augmentation des amplitudes articulaires de la cheville, tant en flexion dorsale qu'en flexion plantaire, mais également par des progrès fonctionnels dans toutes les activités réalisées en position debout. Cette combinaison de traitement permet ainsi d'optimiser les résultats de la rééducation et d'améliorer les capacités fonctionnelles des patients.

### 3.4 Résumé du cadre expérimental

#### **Etude 1 : La spasticité mesurée aux muscles des membres inférieurs d'enfants présentant une Paralyse Cérébrale est-elle un déterminant de leurs capacités fonctionnelles d'équilibration ?**

- ✓ La spasticité mesurée aux muscles des MI avec la MAS, est inversement corrélée aux capacités fonctionnelles d'équilibration évaluées avec la PBS.
- ✓ La spasticité mesurée aux muscles triceps suraux est inversement corrélée au sous-score statique de la PBS.
- ✓ La spasticité mesurée aux muscles fléchisseurs et extenseurs des genoux est inversement corrélée au sous-score dynamique de la PBS.
- ✓ La spasticité mesurée aux muscles triceps suraux affecte particulièrement l'équilibre statique en condition de surface de support de dimension réduite.

#### **Etude 2 : Les paramètres posturographiques, évalués en conditions quasi-statique et dynamique, sont-ils des déterminants des capacités fonctionnelles d'équilibration d'enfants présentant une Paralyse Cérébrale de type spastique ?**

- ✓ En conditions quasi-statiques sur mousse, la longueur du statokinésigramme et l'asymétrie de la répartition du poids du corps entre les MI G et D augmentent significativement par rapport aux conditions avec les yeux ouverts et yeux fermés sur une surface ferme. Ainsi, l'altération de l'information somatosensorielle réduit d'avantage la stabilité que la suppression de l'information visuelle chez les enfants avec PC spastique.
- ✓ En conditions dynamiques et avec des perturbations à basse fréquence, il existe une corrélation négative modérée entre l'amplitude de déplacement du CoP et le sous-score dynamique de PBS pour les perturbations à faible amplitude, ainsi qu'une corrélation négative modérée entre la longueur du statokinésigramme et le sous-score statique de PBS pour les perturbations à haute amplitude.
- ✓ En conditions dynamiques et avec des perturbations à haute fréquence, on observe une corrélation négative modérée entre l'asymétrie de la répartition du poids du corps entre les MI D et G et le sous-score dynamique du PBS.

#### **Etude 3 : Les traitements neuro-orthopédiques dispensés aux enfants présentant une Paralyse Cérébrale de type spastique sont-ils des déterminants de leurs capacités fonctionnelles d'équilibration ?**

- ✓ La spasticité des muscles triceps suraux est courante chez les enfants atteints de PC spastique, et elle est à un impact négatif sur leurs capacités d'équilibration debout. Les traitements neuro-orthopédiques tels que les séries de bottes plâtrées d'allongement musculaire et les injections de BoTx-A et sont souvent utilisés pour lutter la mise en place et l'aggravation des troubles musculo-squelettiques secondaires.
- ✓ Selon cette étude de cas, les traitements neuro-orthopédiques semblent diminuer les capacités posturales et fonctionnelles d'équilibration (PBS).
- ✓ La littérature établit l'importance d'associer aux séries de bottes plâtrées d'allongement musculaire et injections de BoTx-A des séances de rééducation neuro-motrice afin de potentialiser leurs bénéfices moteurs fonctionnels.



## 4 Discussion générale

*« Un enfant enfermé dans ses limites reste incapable de se valoriser et n'arrivera pas à s'adapter au monde extérieur. » (Maria Montessori)*

### 4.1 L'apprentissage de la gestion des degrés de liberté articulaires

Le système musculo-squelettique humain est un système complexe, composé de 206 os, reliés entre eux via 110 articulations et commandés par près de 600 muscles striés squelettiques. Le maintien de l'équilibre debout, requiert l'agencement de ces différents segments corporels les uns par rapport aux autres par la mise en œuvre de plusieurs centaines de Degrés De Liberté (DDL) articulaires, afin de maintenir le CdP dans le polygone de sustentation. Dans ses travaux, Bernstein (1967) définit la coordination comme la maîtrise des DDL du système musculo-squelettique pour en faire un système contrôlable. Il propose alors une description du processus d'apprentissage neuromoteur en trois étapes (Bernstein 1967) :

#### 1. Le contrôle initial des DDL

La diminution du nombre de DDL permet une exploration plus efficace de l'espace sensorimoteur lors de l'acquisition d'une tâche posturo-motrice. Le gel des DDL peut s'opérer à la fois par une fixation rigide des DDL individuels soit par le couplage entre deux articulations. Pour illustration, les premiers pas d'un nourrisson sont caractérisés par une importante rigidité des MI, et sans ballant des MS.

#### 2. La libération des DDL

Les progrès neuromoteurs observés au cours de l'ontogenèse sont caractérisés par une libération progressive des DDL et leur implémentation dans un système dynamique contrôlable. La libération des DDL suit une logique céphalo-caudale et proximo-distale (Newell et al. 1989). Cette chronologie n'est pas sans rappeler le développement neuro-moteur des nourrissons au développement typique qui apprennent la gestion du maintien de la tête avant celle du maintien du tronc, puis à mobiliser leurs épaules et leurs hanches avant leurs segments distaux (apprentissage du retournement puis du ramper puis de la quadrupédie et enfin de la marche) (Roncesvalles, Woollacott, et Jensen 2001).

#### 3. L'exploitation des DDL

La troisième étape de l'apprentissage neuromoteur permet un affinement des coordinations afin d'accroître l'efficacité du système neuromoteur et de diminuer le coût énergétique de la posture et du mouvement (Anne Shumway-Cook et al. 2003).

Voici donc une manière de synthétiser ce travail de thèse et de répondre à notre problématique principale (Figure 4.4-1). En effet, chez les enfants avec PC spastique, les DDL sont diminués d'une part par l'hypertonie musculaire et les troubles musculaires secondaires qui en découlent et d'autre part par les troubles de la commande musculaire qui impliquent des co-contractions musculaires. En effet, les schémas de recrutement musculaire pendant les réponses posturales debout des enfants avec une PC ont une tendance plus forte que les enfants au développement typique au recrutement proximal à distal plutôt que distal à proximal. Aussi, des schémas de recrutement atypiques et des taux plus élevés de co-activation des muscles agonistes et antagonistes de ces enfants avec PC entraînent un contrôle postural inefficace et désorganisé (Pavão 2014; Woollacott et Shumway-Cook 2005; Anne Shumway-Cook et al. 2007; Leonard et al. 2021). Ainsi, ils travaillent plus dur pour une efficacité moindre pour maintenir l'équilibre par rapport à leurs pairs au développement typique.

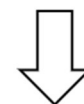
Concernant la spasticité musculaire, elle est couramment décrite comme un facteur majeur contribuant aux limitations fonctionnelles et aux schémas anormaux de mouvement chez les enfants

avec PC. Cependant, elle peut également servir à faciliter certaines tâches fonctionnelles (Patel et al. 2020) La spasticité musculaire chez ces enfants peut interférer avec certaines fonctions mais peut également servir à en faciliter d'autres. Par conséquent, la réduction de la spasticité doit être envisagée dans le contexte de son impact fonctionnel et de nombreux facteurs qui doivent être attentivement pris en compte (Nahm et al. 2018b; Novak et al. 2020; Bar-On et al. 2015). En effet, certains auteurs écrivent que lors d'un syndrome pyramidal, les troubles de la force et de la commande musculaire, peuvent être compensés par la spasticité, permettant de lutter contre la faiblesse musculaire. la spasticité peut être vue comme une compensation il augmentera le tonus musculaire pour compenser. Cependant, il existe des cas où cette réponse sur-réagit et développe une spasticité pathologique qui entraîne une altération de la capacité d'équilibration (D. Graham, Paget, et Wimalasundera 2019; Miller 2018).

Les appareillages de fonction, et plus particulièrement les attelles suro-pédieuses de jour, permettent de moduler les DDL des articulations des pieds, des talo-crurales et des genoux. Ainsi, alors qu'elle sont la plupart du temps pensées pour améliorer les paramètres de déambulation, les attelles suro-pédieuses de fonction jouent également un rôle important dans la fonction d'équilibration. (Degelean et al. 2012; Lintanf et al. 2018; Bahar-Özdemir et al. 2021). Aussi, la rééducation neuro-motrice, et en particulier le renforcement musculaire, peuvent permettre aux enfants avec PC de pouvoir commander la rigidification volontaire d'une ou plusieurs articulations par des co-contractions agonistes/antagonistes. Ainsi, la faiblesse et les troubles de la commande des muscles distaux des Mi peut être suppléée en partie.

A l'inverse, les traitements neuro-orthopédiques proposés à ces enfants permettent de diminuer les DDL de leur système musculo-squelettique : neuro-chirurgie (Rhizotomie Dorsale Sélective, neurotomie), chirurgie orthopédique (allongements muscululo-tendineux, ostéotomies...), injections intra-musculaires de BoTx-A, médicaments oraux antispastiques, plâtres d'allongements musculaires, appareillages de postures...Cependant, une augmentation du nombre de DDL ne peut améliorer les capacités posturales et motrices sans apprentissage de leur gestion. C'est la rééducation neuro-motrice, fonctionnelle et orientée vers la tâche, qui permet cet apprentissage moteur.

↘ du nombre de DDL	↗ du nombre de DDL
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Hypertonie</b> : spasticité, dystonie, viscoélasticité</li> <li>• <b>Troubles musculo-squelettique secondaires</b> : rétractions musculo-tendineuses, fixations articulaires</li> <li>• <b>Appareillages de fonction</b>: attelles suro-pédieuses</li> <li>• <b>Rééducation neuro-motrice</b>: renforcement musculaire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Traitements neuro-orthopédiques (augmentation des amplitudes passives)</b>: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Neurochirurgie, chirurgie orthopédique</li> <li>• Injections de Toxine Botulinique</li> <li>• Traitement médicamenteux antispastiques</li> <li>• Plâtres d'allongement musculaire</li> <li>• Appareillages de postures</li> </ul> </li> <li>• <b>Rééducation neuro-motrice (augmentation des amplitudes actives)</b></li> </ul>



Quand ↗ DDL, nécessité de contrôle moteur :  
**APPRENTISSAGE ET REEDUCATION FONCTIONNELLE**

Figure 4.1-1 :Facteurs de diminution et d'augmentation du nombre de DDL articulaires chez les enfants avec PC de type spastique

## **4.2 Intrications vicieuses et vertueuses entre les troubles de la fonction d'équilibration et la diminution des activités motrices globales**

### **4.2.1 Intrications vicieuses entre les troubles de la fonction d'équilibration et la diminution des activités motrices globales**

La PC de type spastique s'accompagne de troubles de la posture et de l'équilibre. On peut les objectiver par des enregistrements posturographiques, indiquant des difficultés de gestion des déplacements du CdP chez les enfants avec PC (Ozal, Aksoy, et Gunel 2022). Mais aussi au travers d'évaluations fonctionnelles telles que l'évaluation via l'échelle PBS (Franjoine et al. 2022). La posture étant la base sur laquelle toutes les activités motrices se construisent, les troubles de la posture et de l'équilibre entraînent alors une diminution des activités motrices globales incluant, la déambulation (Dussault-Picard et al. 2022), la participation aux AVQ (D. J. Bartlett et al. 2014), la participation aux activités de jeux et loisirs, ainsi qu'aux activités physiques. Chez des enfants avec PC, ou plus globalement dans la population générale, la diminution des activités motrices et la sédentarité entraînent une cascade d'altérations physiques (altération de l'état général, déminéralisation osseuse, troubles musculo-squelettiques, douleurs, faiblesse musculaire...)(Vinkel, Rackauskaite, et Finnerup 2022; A. K. Greene 2021; Mus-Peters et al. 2019), physiologiques (déconditionnement cardio-respiratoire et musculaire à l'effort) (Kara et al. 2022; Suk et al. 2021), psychologiques (perte de confiance et d'estime de soi) et sociales (dépendance, diminution de participation aux activités de loisirs...)(Townes et al. 2022; Schmidt et al. 2020).

Aussi, chez les nourrissons au développement typique, l'acquisition des capacités de contrôle postural dépend de la quantité et de la qualité de leurs expériences sensori-motrices quotidiennes (Håkstad et al. 2022). Or les nourrissons et enfants présentant une TND telle quelle la PC souffrent de carences d'activités motrices globales et d'expériences sensori-motrices comparé à leurs pairs au développement typique (Malak et al. 2015; Verbecque et al. 2021; Fong, Tsang, et Ng 2012; Cheng et al. 2022). De plus, l'apparition avec la croissance des troubles musculo-squelettiques secondaires entrave d'autant plus ces activités motrices globales.

Enfin, les troubles de l'équilibre, la perte progressive de la force musculaire et la détérioration de la mobilité globale contribuent à l'augmentation du risque de chutes observé chez les enfants avec PC aussi bien au cours d'AVQ au domicile, qu'à l'école ou lors d'activités de loisirs et jeux. En 2018, Boyer et al. décrivent que le nombre de chutes dans cette population augmente du GMFCS I vers le II puis diminue du GMFCS II vers le GMFCS IV. La fréquence des chutes diminue significativement en fonction de l'âge, ce qui a du sens du point de vue du développement moteur puisque la maîtrise des compétences posturales s'améliore avec l'expérience motrice (Boyer et Patterson 2018). Aussi, les enfants présentant un handicap moteur sont d'avantage exposés aux traumatismes crânio-faciaux lors de chutes que les enfants au développement typique qui eux présentent davantage des blessures aux membres supérieurs grâce à l'efficacité de leurs réactions parachutes (Wist et al. 2022; Alemdaroğlu et al. 2017). Les enfants et adolescents avec PC présentent une prévalence élevée de fractures en lien avec la faible densité minérale osseuse à laquelle ils sont sujets (Mus-Peters et al. 2019; Ko et al. 2020). En plus des séquelles physiques liées aux chutes, ces enfants et adolescents peuvent développer une perte de confiance dans leurs capacités physiques aboutissant à une limitation de la participation et une perte globale de la confiance en eux.

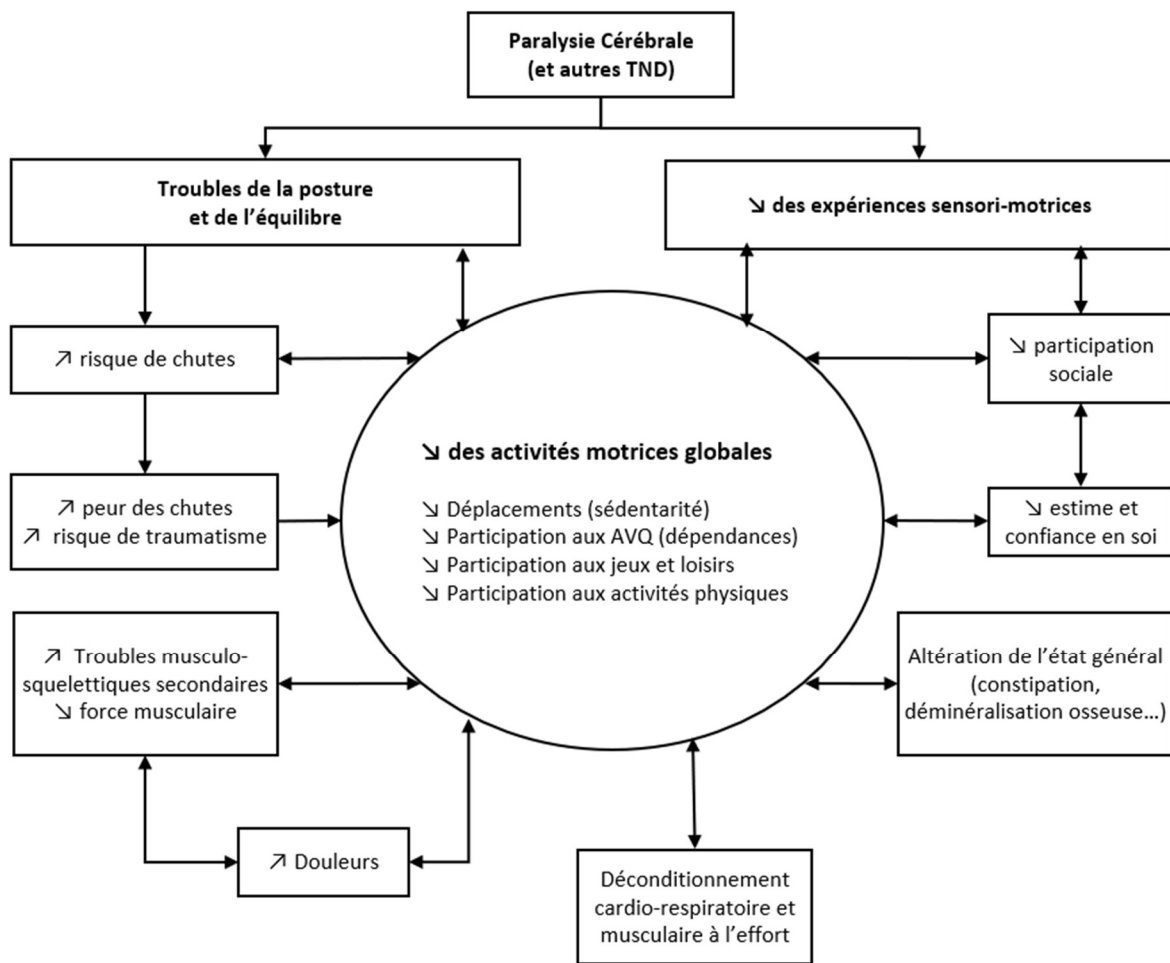


Figure 4.2-1 : Intrications vicieuses entre les troubles de la fonction d'équilibration et la diminution des activités motrices globales

#### 4.2.2 Intrications vertueuses entre les troubles de la fonction d'équilibration et la diminution des activités motrices globales

Dès la vie intra-utérine les accélérations et mouvements ressentis par le fœtus et induits par les déplacements de sa maman lui donne ses premières sensations vestibulaires. Les nourrissons au développement typique acquièrent au cours des premiers mois de leur vie des capacités posturales (tenue de la tête puis de la station assise) et motrices (retournement, ramper, quadrupédie) qui leur permettent d'explorer le monde qui les entoure. Meilleur étant l'équilibre du tout petit, meilleur seront son agilité et la confiance qu'il développe en sa motricité globale et, par conséquence, meilleures seront ses capacités d'équilibration. Ce processus d'exploration sensori-motrice est d'autant plus altéré chez les enfants présentant une PC que leur handicap moteur est important.

Par contre, si l'on permet aux nourrissons, puis aux enfants présentant une PC, d'augmenter leur activité physique globale au travers de leur déplacements, d'une plus grande autonomie dans leurs AVQ, d'une meilleure participation aux jeux, loisirs et activités physiques, on observe :

- ✓ une amélioration de leurs capacités physiques globales (augmentation de la force musculaire, des capacités cardio respiratoires à l'effort)

- ✓ une augmentation quantitative et qualitative de leurs expériences sensori-motrices qui favorisent les apprentissages et progrès neuro-moteurs

Ainsi, l'activité motrice au sens large permet de lutter contre toutes les causes des troubles de l'équilibre chez ces enfants, aussi bien les causes sensorielles, que centrales et musculo squelettiques. On voit alors se former un cercle vertueux avec l'activité motrice qui améliore les capacités fonctionnelles d'équilibration qui, à leur tour, contribuent à une augmentation de l'activité motrice globale.

En 2020, l'OMS a énoncé des recommandations concernant la pratique d'activités physiques pour les enfants et adolescents présentant un handicap. Ceux-ci « *devraient consacrer au moins 60 minutes par jour, en moyenne, à une activité physique d'intensité modérée à soutenue, principalement d'endurance, tout au long de la semaine ; devraient pratiquer au moins 3 fois par semaine des activités d'endurance d'intensité soutenue, ainsi que des activités qui renforcent le système musculaire et l'état osseux ; devraient limiter leur temps de sédentarité en particulier le temps de loisir passé devant un écran.* » (Organisation mondiale de la Santé 2020). Cependant, ce qui ressort d'une manière générale est que les enfants atteints de maladie chronique (obésité, diabète, arthrite juvénile, asthme) ont des niveaux d'activités physiques plus faibles que les enfants en bonne santé apparente (Cheng, 2010; Maggio, 2010; Vahlkvist, 2009; Winter, 2009). En 2021, Suk et al. ont écrit que les enfants avec PC de niveau GMFCS II et/ou III présentaient un niveau global de capacité physique (cardiaque, respiratoire, musculaire) inférieur à celui des enfants GMFCS I. Ils soulignent également que l'importance d'augmenter le quantité et l'intensité des activités physiques est croissante avec le niveau de GMFCS (Suk et al. 2021).

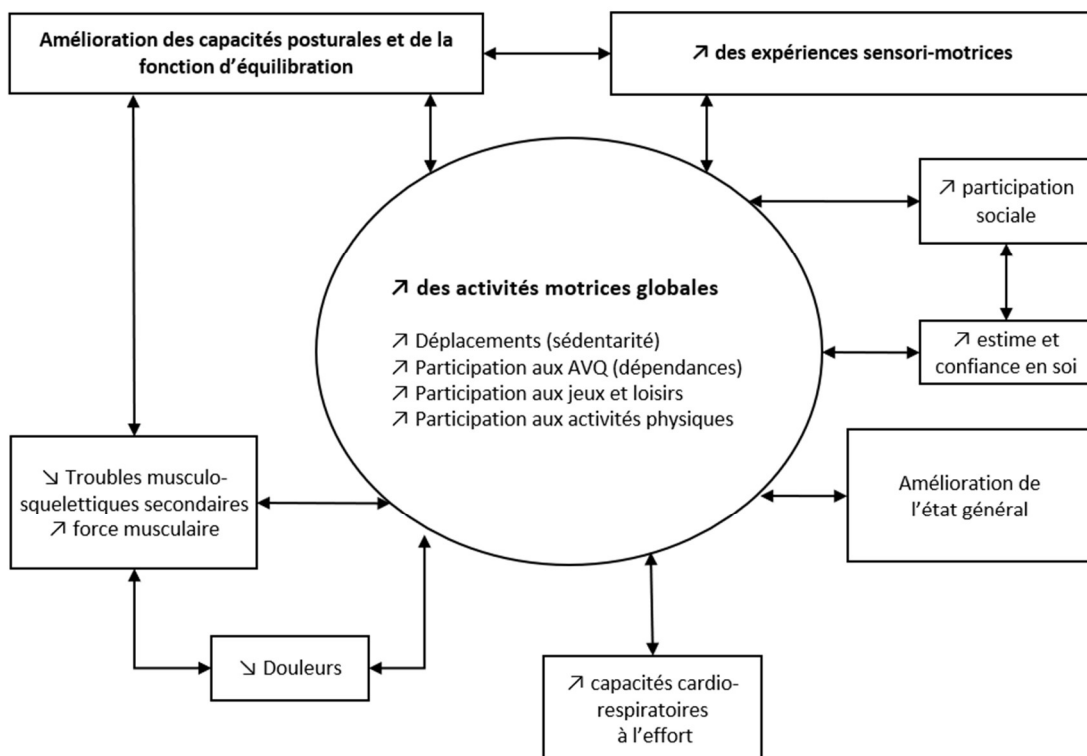


Figure 4.2-2 : Intrications vertueuses entre les troubles de la fonction d'équilibration et la diminution des activités motrices globales

### 4.3 Implications cliniques

Un certain nombre de pistes d'améliorations cliniques, concernant la rééducation/réadaptation de la fonction d'équilibration, émanent de ce travail de thèse. Celles-ci sont synthétisées dans l'encadré ci-dessous.

#### Implications cliniques

##### ✓ **Evaluation de la fonction d'équilibration**

La fonction d'équilibration requiert des mécanismes physiologiques complexes qui nécessitent de croiser les modalités d'évaluation afin de l'envisager dans son ensemble. Les échelles d'évaluation fonctionnelles permettent elles, de mettre en évidence la manière dont chacun utilise ses capacités posturales au cours de ses AVQ. De nombreuses études préconisent de coupler les moyens d'évaluation cliniques, instrumentés et fonctionnels.

La déficience du système somato-sensoriel est considérée comme une cause majeure des troubles de fonctions posturales et motrices et est fréquemment décrite chez les enfants avec PC. Il semble important d'utiliser des échelles standardisées d'évaluation de la fonction somato-sensorielle (Marsico et al. 2022; Silvia Leticia Pavão et al. 2015; Zarkou et al. 2020).

##### ✓ **Rééducation de la fonction d'équilibration**

Afin de pallier aux lacunes d'expériences sensori-motrices des enfants avec PC, il est important de favoriser l'enrichissement environnemental dans toutes les activités de rééducation proposées (Novak et al. 2020).

La posture et l'équilibre sont le socle sur lequel se construit la motricité. Ainsi toute rééducation motrice fonctionnelle engage l'entraînement du contrôle postural, et toute rééducation de la fonction d'équilibration doit s'intégrer à la rééducation neuro-motrice fonctionnelle. Celle-ci s'appuie sur des objectifs fonctionnels co-construits avec l'enfant et sa famille/son aidant et sur les règles de l'apprentissage moteur (répétition, intensité, activités orientées vers la tâche) (Jackman et al. 2022; Kumban et al. 2013; Ogwumike, Badaru, et Adeniyi 2019; Sah, Balaji, et Agrahara 2019; Novak et al. 2020).

##### ✓ **Réadaptation de la fonction d'équilibration**

Il est impératif de permettre aux enfants avec PC d'augmenter au maximum leur autonomie et leur participation sociale. Tous les types d'aides techniques permettant de suppléer les troubles de l'équilibre des enfants avec PC doivent être envisagés et proposés : cannes, déambulateurs, aménagements au domicile et/ou en milieu scolaire...

##### ✓ **Activités Physiques Adaptées**

Le kinésithérapeute doit promouvoir et faciliter l'accès aux activités physiques et sportives aux enfants avec PC : aide au choix des activités physiques en fonction des aptitudes motrices et cardio-respiratoires, des goûts et souhaits du patient, aide à l'acquisition de matériel adapté à la pratique d'activité physique et sportive si cela est nécessaire (tricycle...), encourager sur la durée et re-motiver dès que nécessaire.

## **4.4 Perspectives de recherches**

Un nombre important de nouveaux questionnements émergent de ce travail de thèse, notamment concernant la population d'étude, les technologies d'évaluation de la fonction d'équilibration, ou encore la prise en compte des capacités cognitives des patients.

### **4.4.1 Evaluation de l'impact de l'âge sur le PBS chez les enfants avec PC spastique**

En 2022, Franjoine et al. ont publié une étude évaluant l'impact de l'âge sur le score de PBS d'enfants avec PC et âgés de 2 à 5 ans. Il serait intéressant de poursuivre leur démarche avec des enfants de 5 ans et plus, afin de développer des courbes de score de PBS en fonction de l'âge chez ces enfants (Franjoine et al. 2022). Aussi, un effet plafond est observé chez les enfants au développement typique sur le score de PBS à partir de l'âge de 7 ans. Il serait intéressant de vérifier si cet effet plafond existe aussi chez les enfants avec PC de type spastique, et si oui à partir de quel âge et/ou pour quel(s) GMFCS.

### **4.4.2 Ouverture du champ d'étude aux adolescents, aux adultes, et aux personnes avec paralysie cérébrale modérée à sévère (GMFCS III, IV, V) :**

Tel que nous avons pu le mettre en évidence dans la petite enfance ou l'enfance, la fonction d'équilibration mature et évolue encore au cours de l'adolescence. En effet, les systèmes somato-sensoriels, vestibulaires et visuels, les mécanismes d'intégration centrale, ainsi que le système musculo squelettique se développent jusqu'au début de l'âge adulte. En particulier au moment de la puberté, le corps humain est soumis à de profonds changements métaboliques, hormonaux et structurels qui impactent la gestion des segments corporels les uns par rapport aux autres dans l'espace (Rusek et al. 2021; Wood, Lane, et Cheetham 2019).

D'autre part, chez les adultes vieillissants avec paralysie cérébrale spastique, plusieurs études décrivent des niveaux élevés de fatigabilité, de douleurs musculo squelettique et une détérioration de la marche ne lien avec un équilibre réduit (Opheim et al. 2012). Aussi, Laessoe et al. ont mis en avant une diminution avec l'âge des capacités d'équilibration en double tâche et une altération des stratégies posturales anticipatoires (Laessoe et al. 2019).

Comme bien souvent dans la recherche sur la paralysie cérébrale, les études concernant l'évaluation et la rééducation des capacités d'équilibration des patients GMFCS IV OU V sont bien moins nombreuses que celles concernant les patients avec PC déambulants (GMFCS I à III). La plupart des patients GMFCS IV ont besoin d'une aide technique et/ou humaine pour tenir la position debout, difficilement quantifiable de manière objective. Les patients GMFCS V n'ont aucune capacité de maintien postural debout contre pesanteur. L'évaluation du contrôle postural de ceux-ci passe par l'analyse du contrôle du tronc et de tête en particulier en position assise (Saavedra et Goodworth 2020; Szopa et Domagalska-Szopa 2015; Weaver, Glinka, et Laing 2017). Par ailleurs, Ohata et al. soulignent que les troubles posturaux et moteurs de ces enfants avec PC sévère influencent, non seulement leur autonomie, leur participation sociale mais aussi leur espérance de vie (Ohata et al. 2008).

### **4.4.3 Diversification des technologies d'évaluation d'équilibration**

Au cours de la dernière décennie, de nouvelles technologies impliquant des capteurs portatifs (de type capteurs inertiels, accéléromètres) se sont développés afin de mesurer les capacités d'équilibration en situation écologique. Mais leur utilisation en neuro-pédiatrie reste rare. En effet, leur utilisation est la plupart du temps réservée aux populations adultes atteints de troubles neurologiques centraux avec une bonne fiabilité des données acquises. Ces dispositifs portatifs de l'évaluation de l'équilibre, tout comme la posturographie, permettent de décrire la finalité du contrôle postural mais ne mettent pas

en évidence les mécanismes musculaires et articulaires sous-jacents. De récentes études électromyographiques (Hagio et al. 2022; Glass et al. 2022; Wallard et al. 2016; Kumai et al. 2022; Ghislieri et al. 2020), cinématiques (Glass et al. 2022; Heidt et al. 2021; Mills, Levac, et Svestrup 2018; Kumai et al. 2022; Ting et al. 2015) commencent à combler ces questionnements. En effet, les déplacements du CdP sont le résultat des synergies musculaires et des stratégies posturales d'équilibration qui en découlent.

#### **4.4.4 Prise en compte de l'impact des fonctions supérieures sur les capacités d'équilibration**

La fonction d'équilibration dépend de l'intégration complexe des informations sensorielles et s'adaptent aux objectifs moteurs de chaque individu dans son environnement à un instant donné, en accord avec ses expériences et apprentissages antérieurs. Tout cela requiert la participation de processus cognitifs (Olusanya et al. 2022). Or selon Novak et al., 46% des enfants avec PC présentent des troubles cognitifs de sévérité variable et dont l'impact sur le contrôle postural reste inconnu à ce jour (Novak et al. 2020; Pavao 2014). La littérature décrit chez les enfants avec PC, une distractibilité importante au cours de leurs AVQ, des difficultés à enregistrer certaines informations sensorielles ainsi que des troubles dans l'apprentissage et l'évolution des stratégies posturales au cours des expériences motrices (White et al. 2007; Coelho et Teixeira 2017).

Enfin, comme précédemment mentionné au cours de ce manuscrit, la fonction d'équilibration sert de socle à la production de chacun de nos mouvements. Celle-ci prend alors tout son sens dans des actions dites de double tâche, comme tout simplement être capable de tenir debout tout en saisissant un objet (Samuel 2013). Ceci est particulièrement coûteux sur les plans attentionnel et énergétiques pour les enfants atteints de PC (F.-C. Chen et al. 2012; Schmit 2015; Pavão 2014). Ainsi, les évaluations et la rééducation au cours de tâches fonctionnelles telles que recommandées par la HAS (HAS 2021) semblent également s'appliquer à la fonction d'équilibration.



## 5 Conclusion générale

L'ensemble des résultats et réflexions issus de cette thèse contribuent à mieux cerner la grande complexité des facteurs impliqués dans les capacités fonctionnelles d'équilibration d'enfants avec PC spastique. Les médecins MPR, neuropédiatres et professionnels de rééducation/réadaptation disposent d'outils permettant de bloquer des DDL (en particulier via des appareillages) afin de suppléer un manque de force et/ou de contrôle moteur ou d'en libérer (notamment par des traitements neuro-orthopédiques) pour permettre une motricité plus fluide et efficiente. Cependant la libération de DDL seule ne peut suffire à améliorer le contrôle postural. Celle-ci doit s'accompagner de rééducation neuro-motrice fonctionnelle et orientée vers la tâche, afin que la nouvelle mobilité articulaire soit utile et non déstabilisante au cours des AVQ, déplacements, jeux et loisirs de ces enfants.

Le terme Maori actuel pour désigner la PC «hōkai nukurangi», signifie littéralement «traverser la terre» et métaphoriquement «réaliser ce qui est important pour la personne» (Dan 2022). A nous donc, professionnels de santé et de rééducation/réadaptation de trouver l'équilibre fin dans la gestion des DDL, et de guider ces enfants au mieux dans leurs apprentissages posturaux et moteurs, afin qu'ils puissent réaliser tout ce qui est important pour eux.

## Bibliographie

- Abdel Ghafar, Mohamed A., Osama R. Abdelraouf, Abdelgalil A. Abdelgalil, Mohamed K. Seyam, Rafik E. Radwan, et Amira E. El-Bagalaty. 2022. « Quantitative Assessment of Sensory Integration and Balance in Children with Autism Spectrum Disorders: Cross-Sectional Study ». *Children (Basel, Switzerland)* 9 (3): 353. <https://doi.org/10.3390/children9030353>.
- Abelin-Genevois, Kariman. 2021. « Sagittal Balance of the Spine ». *Orthopaedics & Traumatology, Surgery & Research: OTSR* 107 (1S): 102769. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2020.102769>.
- Adkin, Allan L., James S. Frank, Mark G. Carpenter, et Gerhard W. Peysar. 2002. « Fear of Falling Modifies Anticipatory Postural Control ». *Experimental Brain Research* 143 (2): 160-70. <https://doi.org/10.1007/s00221-001-0974-8>.
- Afnan, Zavata, Arshad Nawaz Malik, Saira Jahan, et Arshad Ali. 2023. « Association of Muscles Length and Strength with Balance and Functional Status among Children with Diplegic Spastic Cerebral Palsy ». *JPMA. The Journal of the Pakistan Medical Association* 73 (2): 253-57. <https://doi.org/10.47391/JPMA.5174>.
- Alemdaroglu, Ebru, Sibel Demir Özbudak, Sibel Mandiroglu, Seda Alakoç Biçer, Neşe Özgirgin, et Halil Uçan. 2017. « Predictive Factors for Inpatient Falls among Children with Cerebral Palsy ». *Journal of Pediatric Nursing* 32 (février): 25-31. <https://doi.org/10.1016/j.pedn.2016.08.005>.
- Alhusaini, Adel A. A., Catherine M. Dean, Jack Crosbie, Roberta B. Shepherd, et Jenny Lewis. 2010. « Evaluation of Spasticity in Children with Cerebral Palsy Using Ashworth and Tardieu Scales Compared with Laboratory Measures ». *Journal of Child Neurology* 25 (10): 1242-47. <https://doi.org/10.1177/0883073810362266>.
- Allison, Leslie, et John J. Jeka. 2004. « Multisensory Integration: Resolving Ambiguities for Human Postural Control ». In *The handbook of multisensory processes*, 785-97. Cambridge, MA, US: Boston Review. <https://doi.org/10.7551/mitpress/3422.003.0059>.
- Almutairi, A., G. D. Cochrane, et J. B. Christy. 2019. « Vestibular and Oculomotor Function in Children with CP: Descriptive Study ». *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology* 119 (avril): 15-21. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2018.12.038>.
- Alotaibi, Madawi, Toby Long, Elizabeth Kennedy, et Siddhi Bavishi. 2014. « The efficacy of GMFM-88 and GMFM-66 to detect changes in gross motor function in children with cerebral palsy (CP): a literature review ». *Disability and Rehabilitation* 36 (8): 617-27. <https://doi.org/10.3109/09638288.2013.805820>.
- Amatya, B., L. E. Cofré Lizama, A. Elmalik, A. Bastani, M. P. Galea, et F. Khan. 2019. « Multidimensional Evaluation of Changes in Limb Function Following Botulinum Toxin Injection in Persons with Stroke ». *NeuroRehabilitation* 45 (1): 67-78. <https://doi.org/10.3233/NRE-192722>.
- Amiel-Tison, Claudine. 2008. « Bases physiopathologiques et description de l'examen neuromoteur du nouveau-né et du jeune enfant ». *Cahiers de PréAut* 5 (1): 97. <https://doi.org/10.3917/capre.005.0097>.
- Amirmudin, Noor Amirah, Grace Lavelle, Tim Theologis, Nicky Thompson, et Jennifer M. Ryan. 2019. « Multilevel Surgery for Children With Cerebral Palsy: A Meta-Analysis ». *Pediatrics* 143 (4): e20183390. <https://doi.org/10.1542/peds.2018-3390>.
- An, Mihee, et Robert J. Palisano. 2014. « Family-Professional Collaboration in Pediatric Rehabilitation: A Practice Model ». *Disability and Rehabilitation* 36 (5): 434-40. <https://doi.org/10.3109/09638288.2013.797510>.
- Anderson, Deborah K., et Donna Cech. 2019. « Utilization of the Pediatric Modified Dynamic Gait Index: Issues Related to Child Development ». *Physical & Occupational Therapy in Pediatrics* 39 (6): 669-78. <https://doi.org/10.1080/01942638.2019.1606131>.
- Ansari, Nouredin Nakhostin, Maryam Rahimi, Soofia Naghdi, Zahra Barzegar-Ganji, Scott Hasson, et Ehsan Moghimi. 2022. « Inter- and Intra-Rater Reliability of the Modified Modified Ashworth

- Scale in the Assessment of Muscle Spasticity in Cerebral Palsy: A Preliminary Study ». *Journal of Pediatric Rehabilitation Medicine* 15 (1): 151-58. <https://doi.org/10.3233/PRM-190648>.
- Araújo, Fábio A., Daniela Simões, Poliana Silva, Nuno Alegrete, et Raquel Lucas. 2019. « Sagittal Standing Posture and Relationships with Anthropometrics and Body Composition during Childhood ». *Gait & Posture* 73 (septembre): 45-51. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.07.130>.
- Aruin, Alexander S. 2016. « Enhancing Anticipatory Postural Adjustments: A Novel Approach to Balance Rehabilitation ». *Journal of novel physiotherapies* 6 (2): e144. <https://doi.org/10.4172/2165-7025.1000e144>.
- Aruin, Alexander S, William R Forrest, et Mark L Latash. 1998. « Anticipatory Postural Adjustments in Conditions of Postural Instability ». *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Electromyography and Motor Control* 109 (4): 350-59. [https://doi.org/10.1016/S0924-980X\(98\)00029-0](https://doi.org/10.1016/S0924-980X(98)00029-0).
- Assaiante, C., et B. Amblard. 1992. « Peripheral Vision and Age-Related Differences in Dynamic Balance ». *Human Movement Science* 11 (5): 533-48. [https://doi.org/10.1016/0167-9457\(92\)90014-3](https://doi.org/10.1016/0167-9457(92)90014-3).
- Assaiante, C 1993. « Ontogenesis of Head Stabilization in Space during Locomotion in Children: Influence of Visual Cues ». *Experimental Brain Research* 93 (3): 499-515. <https://doi.org/10.1007/bf00229365>.
- Assaiante, C 1995. « An Ontogenetic Model for the Sensorimotor Organization of Balance Control in Humans ». *Human Movement Science* 14 (1): 13-43. [https://doi.org/10.1016/0167-9457\(94\)00048-J](https://doi.org/10.1016/0167-9457(94)00048-J).
- Assaiante, Christine. 1998. « Development of locomotor balance control in healthy children ». *Neuroscience & biobehavioral reviews* 22 (4): 527-32.
- Assaiante, Christine, Sophie Mallau, Sébastien Viel, Marianne Jover, et Christina Schmitz. 2005. « Development of postural control in healthy children: a functional approach ». *Neural plasticity* 12 (2-3): 109-18. <http://www.hindawi.com/journals/np/2005/523497/abs/>.
- Avery, Lisa M, Dianne J Russell, et Peter L Rosenbaum. 2013. « Criterion Validity of the GMFM-66 Item Set and the GMFM-66 Basal and Ceiling Approaches for Estimating GMFM-66 Scores ». *Developmental Medicine & Child Neurology* 55 (6): 534-38. <https://doi.org/10.1111/dmcn.12120>.
- Badawi, Nadia, Sarah McIntyre, et Rod W. Hunt. 2021. « Perinatal Care with a View to Preventing Cerebral Palsy ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 63 (2): 156-61. <https://doi.org/10.1111/dmcn.14754>.
- Bahar-Özdemir, Yeliz, Çağrı Ünal-Ulutatar, Duygu Karali-Bingül, et Evrim Karadağ-Saygı. 2021. « Efficacy of Foot-Ankle Orthosis on Balance for Children with Hemiplegic Cerebral Palsy: An Observational Study ». *Turkish Journal of Physical Medicine and Rehabilitation* 67 (3): 336-43. <https://doi.org/10.5606/tftrd.2021.5175>.
- Bair, Woei-Nan, Tim Kiemel, John J. Jeka, et Jane E. Clark. 2012. « Development of Multisensory Reweighting Is Impaired for Quiet Stance Control in Children with Developmental Coordination Disorder (DCD) ». *PLoS One* 7 (7): e40932. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040932>.
- Baker, Nicky, Claire Gough, et Susan Gordon. 2020. « Classification of Balance Assessment Technology: A Scoping Review of Systematic Reviews ». *Studies in Health Technology and Informatics* 268 (mars): 45-59. <https://doi.org/10.3233/SHTI200005>.
- Bañas, Benjamin B., et Edward James R. Gorgon. 2014. « Clinimetric Properties of Sitting Balance Measures for Children with Cerebral Palsy: A Systematic Review ». *Physical & Occupational Therapy in Pediatrics* 34 (3): 313-34. <https://doi.org/10.3109/01942638.2014.881952>.
- Bandong, Aila Nica J., Gilbert O. Madriaga, et Edward James R. Gorgon. 2015. « Reliability and Validity of the Four Square Step Test in Children with Cerebral Palsy and Down Syndrome ». *Research in Developmental Disabilities* 47 (décembre): 39-47. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2015.08.012>.

- Barber, Lee, Rod Barrett, et Glen Lichtwark. 2012. « Medial Gastrocnemius Muscle Fascicle Active Torque-Length and Achilles Tendon Properties in Young Adults with Spastic Cerebral Palsy ». *Journal of Biomechanics* 45 (15): 2526-30. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2012.07.018>.
- Bardy, B. G., L. Marin, T. A. Stoffregen, et R. J. Bootsma. 1999. « Postural Coordination Modes Considered as Emergent Phenomena ». *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance* 25 (5): 1284-1301. <https://doi.org/10.1037//0096-1523.25.5.1284>.
- Bardy, Benoît G., Olivier Oullier, Reinoud J. Bootsma, et Thomas A. Stoffregen. 2002. « Dynamics of Human Postural Transitions ». *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance* 28 (3): 499-514.
- Bar-On, Lynn, Guy Molenaers, Erwin Aertbeliën, Anja Van Campenhout, Hilde Feys, Bart Nuttin, et Kaat Desloovere. 2015. « Spasticity and Its Contribution to Hypertonia in Cerebral Palsy ». *BioMed Research International* 2015: 317047. <https://doi.org/10.1155/2015/317047>.
- Barozzi, Stefania, Marina Socci, Daniela Soi, Federica Di Bernardino, Giovanni Fabio, Stella Forti, Anna M. Gasbarre, Daniele Brambilla, et Antonio Cesarani. 2014. « Reliability of Postural Control Measures in Children and Young Adolescents ». *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology: Official Journal of the European Federation of Oto-Rhino-Laryngological Societies (EUFOS): Affiliated with the German Society for Oto-Rhino-Laryngology - Head and Neck Surgery* 271 (7): 2069-77. <https://doi.org/10.1007/s00405-014-2930-9>.
- Bartlett, Doreen, et Trevor Birmingham. 2003. « Validity and Reliability of a Pediatric Reach Test ». *Pediatric Physical Therapy* 15 (2): 84. <https://doi.org/10.1097/01.PEP.0000067885.63909.5C>.
- Bartlett, Doreen J., Lisa A. Chiarello, Sarah Westcott McCoy, Robert J. Palisano, Lynn Jeffries, Alyssa LaForme Fiss, et Piotr Wilk. 2014. « Determinants of Self-Care Participation of Young Children with Cerebral Palsy ». *Developmental Neurorehabilitation* 17 (6): 403-13. <https://doi.org/10.3109/17518423.2014.897398>.
- Bartlett, Doreen J., Barbara Galuppi, Robert J. Palisano, et Sarah Westcott McCoy. 2016. « Consensus Classifications of Gross Motor, Manual Ability, and Communication Function Classification Systems between Therapists and Parents of Children with Cerebral Palsy ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 58 (1): 98-99. <https://doi.org/10.1111/dmcn.12933>.
- Bednarczuk, Grzegorz, Ida Wiszomirska, Izabela Rutkowska, et Waldemar Skowroński. 2021. « Role of Vision in Static Balance in Persons with and without Visual Impairments ». *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine* 57 (4): 593-99. <https://doi.org/10.23736/S1973-9087.21.06425-X>.
- Belenkii, V. E., V. S. Gurfinkel, et E. I. Paltsev. 1967. « ON THE CONTROL ELEMENTS OF VOLUNTARY MOVEMENTS ». *Biofizika* 12: 135-41.
- Benfer, Katherine A., Kelly A. Weir, Kristie L. Bell, Robert S. Ware, Peter S. W. Davies, et Roslyn N. Boyd. 2017. « The Eating and Drinking Ability Classification System in a Population-Based Sample of Preschool Children with Cerebral Palsy ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 59 (6): 647-54. <https://doi.org/10.1111/dmcn.13403>.
- Berg, K. O., S. L. Wood-Dauphinee, J. I. Williams, et B. Maki. 1992. « Measuring Balance in the Elderly: Validation of an Instrument ». *Canadian Journal of Public Health = Revue Canadienne De Sante Publique* 83 Suppl 2 (août): S7-11.
- Berg, Marie, Reidun Jahnsen, Kathrine Frey Frøslie, et Aktahr Hussain. 2004. « Reliability of the Pediatric Evaluation of Disability Inventory (PEDI) ». *Physical & Occupational Therapy In Pediatrics* 24 (3): 61-77. [https://doi.org/10.1300/J006v24n03\\_05](https://doi.org/10.1300/J006v24n03_05).
- Bernshtein, N. A. 1967. *The Co-Ordination and Regulation of Movements*. [1st English ed.]. Oxford: Pergamon Press. <http://books.google.com/books?id=F9dqAAAAMAAJ>.
- Berthoz, Alain. 2008. « Physiologie de la perception et de l'action ». *L'annuaire du Collège de France. Cours et travaux*, n° 108 (décembre): 303-27. <https://doi.org/10.4000/annuaire-cdf.314>.
- Bexelius, Annemarie, Eva Brogren Carlberg, et Kristina Löwing. 2018. « Quality of Goal Setting in Pediatric Rehabilitation-A SMART Approach ». *Child: Care, Health and Development* 44 (6): 850-56. <https://doi.org/10.1111/cch.12609>.

- Bigongiari, Aline, Flávia de Andrade e Souza, Patrícia Martins Franciulli, Semaan El Razi Neto, Rubens Correa Araujo, et Luis Mochizuki. 2011. « Anticipatory and Compensatory Postural Adjustments in Sitting in Children with Cerebral Palsy ». *Human Movement Science* 30 (3): 648-57. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2010.11.006>.
- Black, F. Owen, Conrad Wall, Howard E. Rockette, et Russell Kitch. 1982. « Normal Subject Postural Sway during the Romberg Test ». *American Journal of Otolaryngology* 3 (5): 309-18. [https://doi.org/10.1016/S0196-0709\(82\)80002-1](https://doi.org/10.1016/S0196-0709(82)80002-1).
- Blake, Sharon F., Stuart Logan, Ginny Humphreys, Justin Matthews, Morwenna Rogers, Joanna Thompson-Coon, Katrina Wyatt, et Christopher Morris. 2015. « Sleep Positioning Systems for Children with Cerebral Palsy ». *The Cochrane Database of Systematic Reviews* 2015 (11): CD009257. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD009257.pub2>.
- Bleyenheuft, Yannick, et Andrew M. Gordon. 2013. « Precision Grip Control, Sensory Impairments and Their Interactions in Children with Hemiplegic Cerebral Palsy: A Systematic Review ». *Research in Developmental Disabilities* 34 (9): 3014-28. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2013.05.047>.
- Bloemen, Manon, Leontien Van Wely, Jurgen Mollema, Annet Dallmeijer, et Janke de Groot. 2017. « Evidence for Increasing Physical Activity in Children with Physical Disabilities: A Systematic Review ». *Developmental Medicine & Child Neurology* 59 (10): 1004-10. <https://doi.org/10.1111/dmcn.13422>.
- Bloom, David A., Daniel J. Kaplan, Edward Mojica, Eric J. Strauss, Guillem Gonzalez-Lomas, Kirk A. Campbell, Michael J. Alaia, et Laith M. Jazrawi. 2023. « The Minimal Clinically Important Difference: A Review of Clinical Significance ». *The American Journal of Sports Medicine* 51 (2): 520-24. <https://doi.org/10.1177/03635465211053869>.
- Blum, Lisa, et Nicol Korner-Bitensky. 2008. « Usefulness of the Berg Balance Scale in Stroke Rehabilitation: A Systematic Review ». *Physical Therapy* 88 (5): 559-66. <https://doi.org/10.2522/ptj.20070205>.
- Blumetti, Francesco C., João Carlos Belloti, Marcel JS Tamaoki, et José A. Pinto. 2019. « Botulinum Toxin Type A in the Treatment of Lower Limb Spasticity in Children with Cerebral Palsy ». *Cochrane Database of Systematic Reviews*, n° 10. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD001408.pub2>.
- Bogin, B., M. Kapell, M. I. Varela Silva, A. B. Orden, P. K. Smith, et J. Loucky. 2001. « How Genetic Are Human Body Proportions? » In *Perspectives in Human Growth, Development and Maturation*, édité par Parasmani Dasgupta et Roland Hauspie, 205-21. Dordrecht: Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-9801-9\\_17](https://doi.org/10.1007/978-94-015-9801-9_17).
- Bohannon, R. W., et M. B. Smith. 1987. « Interrater Reliability of a Modified Ashworth Scale of Muscle Spasticity ». *Physical Therapy* 67 (2): 206-7. <https://doi.org/10.1093/ptj/67.2.206>.
- Bohannon, Richard W., Patricia A. Larkin, Amy C. Cook, James Gear, et Julio Singer. 1984. « Decrease in Timed Balance Test Scores with Aging ». *Physical Therapy* 64 (7): 1067-70. <https://doi.org/10.1093/ptj/64.7.1067>.
- Bouisset, S., et M. Zattara. 1987. « Biomechanical Study of the Programming of Anticipatory Postural Adjustments Associated with Voluntary Movement ». *Journal of Biomechanics* 20 (8): 735-42. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(87\)90052-2](https://doi.org/10.1016/0021-9290(87)90052-2).
- Bourelle, Sophie, Benoît Berge, Vincent Gautheron, et Jérôme Cottalorda. 2010. « Computerized Static Posturographic Assessment after Treatment of Equinus Deformity in Children with Cerebral Palsy ». *Journal of Pediatric Orthopedics. Part B* 19 (3): 211-20. <https://doi.org/10.1097/BPB.0b013e32832e957a>.
- Bowal, N., A. Nettel-Aguirre, G. Ursulak, E. Condliffe, I. Robu, S. Goldstein, C. Emery, J. L. Ronsky, et G. Kuntze. 2021. « Associations of Hamstring and Triceps Surae Muscle Spasticity and Stance Phase Gait Kinematics in Children with Spastic Diplegic Cerebral Palsy ». *Journal of Biomechanics* 117 (mars): 110218. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2020.110218>.
- Boyer, Elizabeth R., et Aleksys Patterson. 2018. « Gait Pathology Subtypes Are Not Associated with Self-Reported Fall Frequency in Children with Cerebral Palsy ». *Gait & Posture* 63: 189-94. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.05.004>.

- Brandenburg, Joline E., Amy E. Rabatin, et Sherilyn W. Driscoll. 2023. « Spasticity Interventions: Decision-Making and Management ». *Pediatric Clinics* 0 (0). <https://doi.org/10.1016/j.pcl.2023.01.005>.
- Brien, Marie, et Heidi Sveistrup. 2011. « An Intensive Virtual Reality Program Improves Functional Balance and Mobility of Adolescents with Cerebral Palsy ». *Pediatric Physical Therapy: The Official Publication of the Section on Pediatrics of the American Physical Therapy Association* 23 (3): 258-66. <https://doi.org/10.1097/PEP.0b013e318227ca0f>.
- Bronstein, A. M. 2016. « Multisensory Integration in Balance Control ». *Handbook of Clinical Neurology* 137: 57-66. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63437-5.00004-2>.
- Buizer, Annemieke I., Brian H. M. Martens, Casey Grandbois van Ravenhorst, Linda J. Schoonmade, Jules G. Becher, et R. Jeroen Vermeulen. 2019. « Effect of Continuous Intrathecal Baclofen Therapy in Children: A Systematic Review ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 61 (2): 128-34. <https://doi.org/10.1111/dmcn.14005>.
- Burke, Robert E. 2007. « Sir Charles Sherrington's the integrative action of the nervous system: a centenary appreciation ». *Brain* 130 (4): 887-94.
- Burtner, P. A., C. Qualls, et M. H. Woollacott. 1998. « Muscle activation characteristics of stance balance control in children with spastic cerebral palsy ». *Gait & posture* 8 (3): 163-74.
- Butti, Niccolò, Rosario Montirosso, Lorenzo Giusti, Luigi Piccinini, Renato Borgatti, et Cosimo Urgesi. 2019. « Early Brain Damage Affects Body Schema and Person Perception Abilities in Children and Adolescents with Spastic Diplegia ». *Neural Plasticity* 2019: 1678984. <https://doi.org/10.1155/2019/1678984>.
- Calatayud, Joaquin, Sebastien Borreani, Juan Carlos Colado, Fernando Martin, et Jorge Flandez. 2014. « Test-Retest Reliability of the Star Excursion Balance Test in Primary School Children ». *The Physician and Sportsmedicine* 42 (4): 120-24. <https://doi.org/10.3810/psm.2014.11.2098>.
- Carey, Helen, Kathy Martin, Stephanie Combs-Miller, et Jill C. Heathcock. 2016. « Reliability and Responsiveness of the Timed Up and Go Test in Children With Cerebral Palsy ». *Pediatric Physical Therapy: The Official Publication of the Section on Pediatrics of the American Physical Therapy Association* 28 (4): 401-8. <https://doi.org/10.1097/PEP.0000000000000301>.
- Cascio, Carissa J. 2010. « Somatosensory Processing in Neurodevelopmental Disorders ». *Journal of Neurodevelopmental Disorders* 2 (2): 62-69. <https://doi.org/10.1007/s11689-010-9046-3>.
- Casey, Jackie, Andreas Rosenblad, et Elisabet Rodby-Bousquet. 2022. « Postural Asymmetries, Pain, and Ability to Change Position of Children with Cerebral Palsy in Sitting and Supine: A Cross-Sectional Study ». *Disability and Rehabilitation* 44 (11): 2363-71. <https://doi.org/10.1080/09638288.2020.1834628>.
- Cavallari, Paolo, Francesco Bolzoni, Carlo Bruttini, et Roberto Esposti. 2016. « The Organization and Control of Intra-Limb Anticipatory Postural Adjustments and Their Role in Movement Performance ». *Frontiers in Human Neuroscience* 10. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnhum.2016.00525>.
- Caynes, Katy, Tanya A. Rose, Deborah Theodoros, Debbie Burmester, Robert S. Ware, et Leanne M. Johnston. 2019. « The Functional Communication Classification System: Extended Reliability and Concurrent Validity for Children with Cerebral Palsy Aged 5 to 18 Years ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 61 (7): 805-12. <https://doi.org/10.1111/dmcn.14135>.
- Chauhan, Anil, Manvi Singh, Nishant Jaiswal, Amit Agarwal, Jitendra Kumar Sahu, et Meenu Singh. 2019. « Prevalence of Cerebral Palsy in Indian Children: A Systematic Review and Meta-Analysis ». *Indian Journal of Pediatrics* 86 (12): 1124-30. <https://doi.org/10.1007/s12098-019-03024-0>.
- Chen, Chia-ling. 2013. « Validity, Responsiveness, Minimal Detectable Change, and Minimal Clinically Important Change of Pediatric Balance Scale in Children with Cerebral Palsy ». *Research in Developmental Disabilities, Research in Developmental Disabilities*, 34 (3): 916-22. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2012.11.006>.
- Chen, Chia-ling, Chung-yao Chen, Hsieh-ching Chen, Wen-yu Liu, I.-hsuan Shen, et Keh-chung Lin. 2013. « Potential Predictors of Changes in Gross Motor Function during Various Tasks for Children

- with Cerebral Palsy: A Follow-up Study ». *Research in Developmental Disabilities* 34 (1): 721-28. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2012.10.009>.
- Chen, Fu-Chen, Chia-Liang Tsai, Thomas A. Stoffregen, Chihu-Hui Chang, et Michael G. Wade. 2012. « Postural Adaptations to a Suprapostural Memory Task among Children with and without Developmental Coordination Disorder ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 54 (2): 155-59. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2011.04092.x>.
- Cheng, Yoyo T. Y., Louisa M. Y. Chung, Joanne W. Y. Chung, Catherine Mary Schooling, Yang Gao, Young-Hyeon Bae, William W. N. Tsang, et Shirley S. M. Fong. 2022. « Atypical Adaptive Postural Responses in Children with Developmental Coordination Disorder: Implications for Rehabilitation ». *Gait & Posture* 98 (octobre): 141-45. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2022.09.007>.
- Chiba, Ryosuke, Kaoru Takakusaki, Jun Ota, Arito Yozu, et Nobuhiko Haga. 2016. « Human Upright Posture Control Models Based on Multisensory Inputs; in Fast and Slow Dynamics ». *Neuroscience Research*, Body representation in the brain, 104 (mars): 96-104. <https://doi.org/10.1016/j.neures.2015.12.002>.
- Coelho, Daniel Boari, et Luis Augusto Teixeira. 2017. « Cognition and Balance Control: Does Processing of Explicit Contextual Cues of Impending Perturbations Modulate Automatic Postural Responses? » *Experimental Brain Research* 235 (8): 2375-90. <https://doi.org/10.1007/s00221-017-4980-x>.
- Cohen, H., C. A. Blatchly, et L. L. Gombash. 1993. « A Study of the Clinical Test of Sensory Interaction and Balance ». *Physical Therapy* 73 (6): 346-51; discussion 351-354. <https://doi.org/10.1093/ptj/73.6.346>.
- Colver, Allan, Charles Fairhurst, et Peter OD Pharoah. 2014. « Cerebral Palsy ». [http://www.researchgate.net/profile/Peter\\_Pharoah/publication/258852050\\_Cerebral\\_palsy/links/0c96053885eccd398f000000.pdf](http://www.researchgate.net/profile/Peter_Pharoah/publication/258852050_Cerebral_palsy/links/0c96053885eccd398f000000.pdf).
- Condon, Cillin, et Katie Cremin. 2014. « Static Balance Norms in Children ». *Physiotherapy Research International* 19 (1): 1-7. <https://doi.org/10.1002/pri.1549>.
- Connell, LA, et SF Tyson. 2012. « Measures of Sensation in Neurological Conditions: A Systematic Review ». *Clinical Rehabilitation* 26 (1): 68-80. <https://doi.org/10.1177/0269215511412982>.
- Cordo, P. J., et L. M. Nashner. 1982. « Properties of postural adjustments associated with rapid arm movements ». *Journal of Neurophysiology* 47 (2): 287-302. <https://doi.org/10.1152/jn.1982.47.2.287>.
- Crenshaw, Jeremy R., Drew A. Petersen, Benjamin C. Conner, James B. Tracy, Jamie Pigman, Henry G. Wright, Freeman Miller, Curtis L. Johnson, et Christopher M. Modlesky. 2020. « Anteroposterior Balance Reactions in Children with Spastic Cerebral Palsy ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 62 (6): 700-708. <https://doi.org/10.1111/dmcn.14500>.
- Damiano, Diane L., Jason R. Wingert, Christopher J. Stanley, et Lindsey Curatalo. 2013. « Contribution of Hip Joint Proprioception to Static and Dynamic Balance in Cerebral Palsy: A Case Control Study ». *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation* 10 (1): 57. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-10-57>.
- Dan, Bernard. 2022. « Naming Cerebral Palsy "CP": Physiology and Service Provision ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 64 (11): 1312-13. <https://doi.org/10.1111/dmcn.15378>.
- Danis, Aysegul, et Muhammet Gultekin Kutluk. 2021. « The Evolution of Cerebral Palsy Publications and Global Productivity: A Bibliometric Analysis between 1980 and 2019 ». *Acta Neurologica Belgica* 121 (6): 1807-14. <https://doi.org/10.1007/s13760-020-01549-2>.
- Darr, Nancy, Mary Rose Franjoine, Suzann K. Campbell, et Everett Smith. 2015. « Psychometric Properties of the Pediatric Balance Scale Using Rasch Analysis ». *Pediatric Physical Therapy: The Official Publication of the Section on Pediatrics of the American Physical Therapy Association* 27 (4): 337-48. <https://doi.org/10.1097/PEP.000000000000178>.
- Dasoju, Vedarri, Rakesh Krishna Kovala, Jaya Shanker Tedla, Devika Rani Sangadala, et Ravi Shankar Reddy. 2021. « Psychometric Properties of Trunk Impairment Scale in Children with Spastic Diplegia ». *Scientific Reports* 11 (1): 18529. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98104-7>.

- Davids, Jon R. 2010. « The Foot and Ankle in Cerebral Palsy ». *Orthopedic Clinics* 41 (4): 579-93. <https://doi.org/10.1016/j.ocl.2010.06.002>.
- De Gooijer-van de Groep, K.L. 2013. « Differentiation between non-neural and neural contributors to ankle joint stiffness in cerebral palsy », *JOURNAL OF NEUROENGINEERING AND REHABILITATION* 81, 10 (81).
- De Oliveira, Vanessa, Lucas Arrebola, Pedro De Oliveira, et Liu Yi. 2021. « Investigation of Muscle Strength, Motor Coordination and Balance in Children with Idiopathic Toe Walking: A Case-Control Study ». *Developmental Neurorehabilitation*, mars, 1-7. <https://doi.org/10.1080/17518423.2021.1899326>.
- De Pieri, E., J. Romkes, C. Wyss, C. Weidensteiner, E. Rutz, M. Garcia, et R. Brunner. 2020. « Effect of Botulinum Toxin A on Muscle Function in Patients with Cerebral Palsy and Its Relation to Gait ». *Gait & Posture*, ESMAC 2020 Abstracts, 81 (septembre): 74-76. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2020.07.062>.
- Degelaen, Marc, Ludo de Borre, Eric Kerckhofs, Linda de Meirleir, Ronald Buyl, Guy Cheron, et Bernard Dan. 2013. « Influence of Botulinum Toxin Therapy on Postural Control and Lower Limb Intersegmental Coordination in Children with Spastic Cerebral Palsy ». *Toxins* 5 (1): 93-105. <https://doi.org/10.3390/toxins5010093>.
- Degelean, Marc, Ludo De Borre, Patrick Salvia, Karine Pelc, Eric Kerckhofs, Linda De Meirleir, Guy Cheron, et Bernard Dan. 2012. « Effect of Ankle-Foot Orthoses on Trunk Sway and Lower Limb Intersegmental Coordination in Children with Bilateral Cerebral Palsy ». *Journal of Pediatric Rehabilitation Medicine* 5 (3): 171-79. <https://doi.org/10.3233/PRM-2012-0209>.
- Deitz, Jean C., Pamela Richardson, Sarah W. Atwater, Terry K. Crowe, et Margaret Odiorne. 1991. « Performance of Normal Children on the Pediatric Clinical Test of Sensory Interaction for Balance ». *The Occupational Therapy Journal of Research* 11 (6): 336-56. <https://doi.org/10.1177/153944929101100602>.
- Delafontaine, Arnaud. 2018. *Locomotion humaine: Bases fondamentales, évaluation clinique et applications thérapeutiques de l'enfant à l'adulte*. Elsevier Health Sciences.
- Deshmukh, Abhijeet A., Sailaksmi Ganesan, et Jaya Shanker Tedla. 2011. « Normal Values of Functional Reach and Lateral Reach Tests in Indian School Children ». *Pediatric Physical Therapy* 23 (1): 23. <https://doi.org/10.1097/PEP.0b013e3182099192>.
- Dewar, Rosalee, Andrew P. Claus, Kylie Tucker, Robert S. Ware, et Leanne M. Johnston. 2019. « Reproducibility of the Kids-BESTest and the Kids-Mini-BESTest for Children With Cerebral Palsy ». *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 100 (4): 695-702. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2018.12.021>.
- Dewar, Rosalee, Sarah Love, et Leanne Marie Johnston. 2015. « Exercise Interventions Improve Postural Control in Children with Cerebral Palsy: A Systematic Review ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 57 (6): 504-20. <https://doi.org/10.1111/dmcn.12660>.
- Dewar, Rosalee M., Kylie Tucker, Andrew P. Claus, Wolbert van den Hoorn, Robert S. Ware, et Leanne M. Johnston. 2022. « Evaluating Validity of the Kids-Balance Evaluation Systems Test (Kids-BESTest) Clinical Test of Sensory Integration of Balance (CTSIB) Criteria to Categorise Stance Postural Control of Ambulant Children with CP ». *Disability and Rehabilitation* 44 (15): 4039-46. <https://doi.org/10.1080/09638288.2021.1887374>.
- Dhanani, Sneha, et Lata Parmar. 2014. « NORMATIVE VALUES OF TANDEM AND UNIPEDAL STANCE IN SCHOOL CHILDREN ». *INTERNATIONAL JOURNAL OF CURRENT RESEARCH REVIEW VOL 6* (décembre).
- Dhote, Sanjivani N., Prema A. Khatri, et Suvarna S. Ganvir. 2012. « Reliability of "Modified Timed up and Go" Test in Children with Cerebral Palsy ». *Journal of Pediatric Neurosciences* 7 (2): 96-100. <https://doi.org/10.4103/1817-1745.102564>.
- Dijkerman, H. Chris, et Edward H. F. de Haan. 2007. « Somatosensory Processes Subserving Perception and Action ». *The Behavioral and Brain Sciences* 30 (2): 189-201; discussion 201-239. <https://doi.org/10.1017/S0140525X07001392>.



- Dimeglio, Alain. 2001. « Growth in Pediatric Orthopaedics ». *Journal of Pediatric Orthopaedics* 21 (4): 549. [https://journals.lww.com/pedorthopaedics/Citation/2001/07000/Growth\\_in\\_Pediatric\\_Orthopaedics.26.aspx](https://journals.lww.com/pedorthopaedics/Citation/2001/07000/Growth_in_Pediatric_Orthopaedics.26.aspx).
- Dinkel, Danae, Kailey Snyder, Victoria Molfese, et Anastasia Kyvelidou. 2017. « Postural Control Strategies Differ in Normal Weight and Overweight Infants ». *Gait & Posture* 55 (juin): 167-71. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.04.017>.
- Domagalska-Szopa, Małgorzata, et Andrzej Szopa. 2013. « Body Posture Asymmetry Differences between Children with Mild Scoliosis and Children with Unilateral Cerebral Palsy ». *BioMed Research International* 2013: 462094. <https://doi.org/10.1155/2013/462094>.
- Donahoe, Betsy, Dale Turner, et Ted Worrell. 1994. « The Use of Functional Reach as a Measurement of Balance in Boys and Girls Without Disabilities Ages 5 to 15 Years ». *Pediatric Physical Therapy* 6 (4): 189. [https://journals.lww.com/pedpt/Abstract/1994/00640/The\\_Use\\_of\\_Functional\\_Reach\\_as\\_a\\_Measurement\\_of.4.aspx](https://journals.lww.com/pedpt/Abstract/1994/00640/The_Use_of_Functional_Reach_as_a_Measurement_of.4.aspx).
- Drefus, Lisa C., Siobhan Clarke, Karen Resnik, Jayme Koltsov, Emily R. Dodwell, et David M. Scher. 2018. « The Root-Ely Modified Test of Rectus Femoris Spasticity Has Reliability in Individuals with Cerebral Palsy ». *HSS Journal* 14 (2): 143-47. <https://doi.org/10.1007/s11420-018-9609-5>.
- Duarte, Natalia. 2014. « Correlation between Pediatric Balance Scale and Functional Test in Children with Cerebral Palsy », n° 26: 849-53.
- Duclos, N, et S. Mesure. 2016. « Contrôle postural : physiologie, concepts principaux et implications pour la réadaptation ».
- Dunn, Winnie. 1994. « Performance of Typical Children on the Sensory Profile: An Item Analysis ». *The American Journal of Occupational Therapy* 48 (11): 967-74. <https://doi.org/10.5014/ajot.48.11.967>.
- Dunn, Winnie, et Debora B. Daniels. 2002. « Initial Development of the Infant/Toddler Sensory Profile ». *Journal of Early Intervention* 25 (1): 27-41. <https://doi.org/10.1177/105381510202500104>.
- Dunn, Winnie, et Kay Westman. 1997. « The Sensory Profile: The Performance of a National Sample of Children Without Disabilities ». *The American Journal of Occupational Therapy* 51 (1): 25-34. <https://doi.org/10.5014/ajot.51.1.25>.
- Dursun, Nigar, Tugba Gokbel, Melike Akarsu, et Erbil Dursun. 2017. « Randomized Controlled Trial on Effectiveness of Intermittent Serial Casting on Spastic Equinus Foot in Children with Cerebral Palsy After Botulinum Toxin-A Treatment ». *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation* 96 (4): 221-25. <https://doi.org/10.1097/PHM.0000000000000627>.
- Dussault-Picard, C., S.G. Mohammadyari, D. Arvisais, M.T. Robert, et P.C. Dixon. 2022. « Gait Adaptations of Individuals with Cerebral Palsy on Irregular Surfaces: A Scoping Review ». *Gait & Posture* 96 (juillet): 35-46. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2022.05.011>.
- Ebrahimi, Amir-Abbas, Guita Movallali, Ali-Ashraf Jamshidi, Mehdi Rahgozar, et Hojjat Allah Haghgoo. 2017. « Postural Control in Deaf Children ». *Acta Medica Iranica* 55 (2): 115-22.
- Ebrahimi, Anahid, Michael H. Schwartz, Jack A. Martin, Tom F. Novacheck, et Darryl G. Thelen. 2022. « Atypical Triceps Surae Force and Work Patterns Underlying Gait in Children with Cerebral Palsy ». *Journal of Orthopaedic Research* 40 (12): 2763-70. <https://doi.org/10.1002/jor.25307>.
- Eggink, H., D. Kremer, O. F. Brouwer, M. F. Contarino, M. E. van Egmond, A. Elema, K. Folmer, et al. 2017. « Spasticity, Dyskinesia and Ataxia in Cerebral Palsy: Are We Sure We Can Differentiate Them? » *European Journal of Paediatric Neurology: EJPn: Official Journal of the European Paediatric Neurology Society* 21 (5): 703-6. <https://doi.org/10.1016/j.ejpn.2017.04.1333>.
- Eldridge, Beverly J., Mary P. Galea, Anne L. Kissane, Jonathan C. Broder, Samuel L. Brilleman, Rory Wolfe, et Gavin Williams. 2020. « High-Level Mobility Assessment Tool Normative Values for Children ». *Physical Therapy* 100 (2): 324-31. <https://doi.org/10.1093/ptj/pzz168>.
- Eliasson, Ann-Christin. 2006. « The Manual Ability Classification System (MACS) for children with cerebral palsy: scale development and evidence of validity and reliability | Developmental

Medicine and Child Neurology | Cambridge Core ». <https://www.cambridge.org/core/journals/developmental-medicine-and-child-neurology/article/abs/manual-ability-classification-system-macs-for-children-with-cerebral-palsy-scale-development-and-evidence-of-validity-and-reliability/D4575C67E6E6AC42CA7C23C6BDCD8B8F>.

- Elliott, Alison M., et Colleen Guimond. 2022. « Genetic Counseling Considerations in Cerebral Palsy ». *Molecular Genetics and Metabolism* 137 (4): 428-35. <https://doi.org/10.1016/j.ymgme.2021.07.004>.
- Elshafey, Mohamed Ali, Mohamed Samy Abdrabo, et Ragab Kamal Elnaggar. 2022. « Effects of a Core Stability Exercise Program on Balance and Coordination in Children with Cerebellar Ataxic Cerebral Palsy ». *Journal of Musculoskeletal & Neuronal Interactions* 22 (2): 172-78.
- Ermer, Julie, et Winnie Dunn. 1998. « The Sensory Profile: A Discriminant Analysis of Children With and Without Disabilities ». *The American Journal of Occupational Therapy* 52 (4): 283-90. <https://doi.org/10.5014/ajot.52.4.283>.
- Ertürk, Gamze, Nazif Ekin Akalan, Halenur Evrendilek, Gülşah Karaca, et Fuat Bilgili. 2021. « The Relationship of One Leg Standing Duration to GMFM Scores and to Stance Phase of Walking in Children with Hemiplegic Cerebral Palsy ». *Physiotherapy Theory and Practice*, mai, 1-5. <https://doi.org/10.1080/09593985.2021.1920078>.
- Evkaya, Ayca, Evrim Karadag-Saygi, Duygu Karali Bingul, et Esra Giray. 2020. « Validity and Reliability of the Dynamic Gait Index in Children with Hemiplegic Cerebral Palsy ». *Gait & Posture* 75 (janvier): 28-33. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.09.024>.
- Fabry, Guy, Liu Xue Cheng, et Guy Molenaers. 1994. « Normal and Abnormal Torsional Development in Children. » *Clinical Orthopaedics and Related Research (1976-2007)* 302 (mai): 22. [https://journals.lww.com/corr/Abstract/1994/05000/Normal\\_and\\_Abnormal\\_Torsional\\_Development\\_in.5.aspx](https://journals.lww.com/corr/Abstract/1994/05000/Normal_and_Abnormal_Torsional_Development_in.5.aspx).
- Faraldo-García, Ana, Sofía Santos-Pérez, Rosa Crujeiras-Casais, Torcuato Labella-Caballero, et Andrés Soto-Varela. 2012. « Influence of Age and Gender in the Sensory Analysis of Balance Control ». *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology* 269 (2): 673-77. <https://doi.org/10.1007/s00405-011-1707-7>.
- Faruk, Tasnuva, Catherine King, Mohammad Muhit, Md Kafiul Islam, Israt Jahan, Kamran Ul Baset, Nadia Badawi, et Gulam Khandaker. 2020. « Screening Tools for Early Identification of Children with Developmental Delay in Low- and Middle-Income Countries: A Systematic Review ». *BMJ Open* 10 (11): e038182. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2020-038182>.
- Faugloire, Elise, Benoît G. Bardy, et Thomas A. Stoffregen. 2009. « (De)Stabilization of Required and Spontaneous Postural Dynamics with Learning ». *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance* 35 (1): 170-87. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.35.1.170>.
- Feldman, Amy B, Stephen M Haley, et Jane Coryell. 1990. « Concurrent and Construct Validity of the Pediatric Evaluation of Disability Inventory ». *Physical Therapy* 70 (10): 602-10. <https://doi.org/10.1093/ptj/70.10.602>.
- Ferber-Viart, C., E. Ionescu, T. Morlet, P. Froehlich, et C. Dubreuil. 2007. « Balance in Healthy Individuals Assessed with Equitest: Maturation and Normative Data for Children and Young Adults ». *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology* 71 (7): 1041-46. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2007.03.012>.
- Fong, Shirley S. M., William W. N. Tsang, et Gabriel Y. F. Ng. 2012. « Altered Postural Control Strategies and Sensory Organization in Children with Developmental Coordination Disorder ». *Human Movement Science* 31 (5): 1317-27. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2011.11.003>.
- Fonseca, Paulo R., Renata Calhes Franco de Moura, Manuela Galli, et Claudia Santos Oliveira. 2018. « Effect of Physiotherapeutic Intervention on the Gait after the Application of Botulinum Toxin in Children with Cerebral Palsy: Systematic Review ». *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine* 54 (5): 757-65. <https://doi.org/10.23736/S1973-9087.17.04940-1>.
- Fontaine, Audrey, Rodolphe Bailly, Christelle Pons, et Josselin Demas. 2023. « Les recommandations de la HAS sur la réadaptation de la fonction motrice des personnes avec paralysie cérébrale :

- en route vers la co-détermination d'objectifs par le trio personne avec PC/aidant/kinésithérapeute ». *Kinésithérapie, la Revue* 23 (254): 21-32. <https://doi.org/10.1016/j.kine.2022.11.008>.
- Fontes, Patrícia Lemos Bueno, Thalita Karla Flores Cruz, Deisiane Oliveira Souto, Ricardo Moura, et Vitor Geraldi Haase. 2017. « Body Representation in Children with Hemiplegic Cerebral Palsy ». *Child Neuropsychology: A Journal on Normal and Abnormal Development in Childhood and Adolescence* 23 (7): 838-63. <https://doi.org/10.1080/09297049.2016.1191629>.
- Forbes, Patrick A., Anthony Chen, et Jean-Sébastien Blouin. 2018a. « Sensorimotor Control of Standing Balance ». *Handbook of Clinical Neurology* 159: 61-83. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63916-5.00004-5>.
- Forbes, Patrick A., Anthony Chen, et Jean-Sébastien Blouin. 2018b. « Chapter 4 - Sensorimotor Control of Standing Balance ». In *Handbook of Clinical Neurology*, édité par Brian L. Day et Stephen R. Lord, 159:61-83. Balance, Gait, and Falls. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63916-5.00004-5>.
- Fosdahl, Merete Aarsland, Reidun Jahnsen, Are Hugo Pripp, et Inger Holm. 2020. « Change in Popliteal Angle and Hamstrings Spasticity during Childhood in Ambulant Children with Spastic Bilateral Cerebral Palsy. A Register-Based Cohort Study ». *BMC Pediatrics* 20 (1): 11. <https://doi.org/10.1186/s12887-019-1891-y>.
- Franjoine. 2003. « Pediatric Balance Scale: A Modified Version of the Berg... : Pediatric Physical Therapy ».
- Franjoine, Mary Rose, Nancy Darr, Sharon L. Held, Karen Kott, et Brenda L. Young. 2010. « The Performance of Children Developing Typically on the Pediatric Balance Scale ». *Pediatric Physical Therapy: The Official Publication of the Section on Pediatrics of the American Physical Therapy Association* 22 (4): 350-59. <https://doi.org/10.1097/PEP.0b013e3181f9d5eb>.
- Franjoine, Mary Rose, Nancy Darr, Brenda Young, Sally Westcott McCoy, et Alyssa LaForme Fiss. 2022. « Examination of the effects of age, sex, and motor ability level on balance capabilities in children with cerebral palsy GMFCS levels I, II, III and typical development using the Pediatric Balance Scale ». *Developmental neurorehabilitation* 25 (2): 115-24.
- Franjoine, Mary Rose, Joan S. Gunther, et Mary Jean Taylor. 2003. « Pediatric Balance Scale: A Modified Version of the Berg Balance Scale for the School-Age Child with Mild to Moderate Motor Impairment »: *Pediatric Physical Therapy* 15 (2): 114-28. <https://doi.org/10.1097/01.PEP.0000068117.48023.18>.
- Franki, Inge, Lynn Bar-On, Guy Molenaers, Anja Van Campenhout, Karen Craenen, Kaat Desloovere, Hilde Feys, Petra Pauwels, Jos De Cat, et Els Ortibus. 2020. « Tone Reduction and Physical Therapy: Strengthening Partners in Treatment of Children with Spastic Cerebral Palsy ». *Neuropediatrics* 51 (2): 89-104. <https://doi.org/10.1055/s-0039-3400987>.
- Fromer, Ilana, et Kumar Belani. 2018. « Anesthesia for Children with Cerebral Palsy ». In *Anesthesiology: A Practical Approach*, 429-34. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-74766-8\\_45](https://doi.org/10.1007/978-3-319-74766-8_45).
- Fukuda, T. 1959. « The Stepping Test: Two Phases of the Labyrinthine Reflex ». *Acta Oto-Laryngologica* 50 (2): 95-108. <https://doi.org/10.3109/00016485909129172>.
- Gagey, Pierre-Marie, et Bernard Weber. 2004. *Posturologie: régulation et dérèglements de la station debout*. Elsevier Masson.
- Gajdosik, Richard L., et Richard W. Bohannon. 1987. « Clinical Measurement of Range of Motion: Review of Goniometry Emphasizing Reliability and Validity ». *Physical Therapy* 67 (12): 1867-72. <https://doi.org/10.1093/ptj/67.12.1867>.
- Galey, Scott A., Zachary F. Lerner, Thomas C. Bulea, Seymour Zimble, et Diane L. Damiano. 2017. « Effectiveness of Surgical and Non-Surgical Management of Crouch Gait in Cerebral Palsy: A Systematic Review ». *Gait & Posture* 54 (mai): 93-105. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.02.024>.

- Galli, Manuela. 2015. « Foot Pressure Distribution in Children with Cerebral Palsy While Standing ». *Research in Developmental Disabilities*, Research in developmental Disabilities, , n° 41-42: 52-57. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2015.05.006>.
- Gan, Sue-Mae, Li-Chen Tung, Yue-Her Tang, et Chun-Hou Wang. 2008. « Psychometric Properties of Functional Balance Assessment in Children with Cerebral Palsy ». *Neurorehabilitation and Neural Repair* 22 (6): 745-53. <https://doi.org/10.1177/1545968308316474>.
- Garrido-Ardila, Elisa Maria, Berta Caro-Puertolas, Maria Jiménez-Palomares, Jesús Montanero-Fernández, Trinidad Rodríguez-Domínguez, et Juan Rodríguez-Mansilla. 2021. « Orthopaedic Disorders in Cerebral Palsy in International Cooperation Projects: A Descriptive Cross-Sectional Study ». *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18 (15): 7872. <https://doi.org/10.3390/ijerph18157872>.
- Gecz, Jozef, et Jesia G. Berry. 2021. « Cerebral Palsy with Autism and ADHD: Time to Pay Attention ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 63 (3): 247-48. <https://doi.org/10.1111/dmcn.14773>.
- Gerhardt, John J., et Robert D. Rondinelli. 2001. « Goniometric Techniques for Range-of-Motion Assessment ». *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America*, Disability Evaluation, 12 (3): 507-28. [https://doi.org/10.1016/S1047-9651\(18\)30047-0](https://doi.org/10.1016/S1047-9651(18)30047-0).
- Gesell, Arnold. 1946. « The ontogenesis of infant behavior ». In *Manual of child psychology*, 295-331. Hoboken, NJ, US: John Wiley & Sons Inc. <https://doi.org/10.1037/10756-006>.
- Ghislieri, Marco, Marco Knaflitz, Luciana Labanca, Giuseppe Barone, Laura Bragonzoni, Maria Grazia Benedetti, et Valentina Agostini. 2020. « Muscle Synergy Assessment During Single-Leg Stance ». *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering: A Publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* 28 (12): 2914-22. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2020.3030847>.
- Giacomozzi, Claudia. 2010. « Appropriateness of Plantar Pressure Measurement Devices: A Comparative Technical Assessment ». *Gait & Posture* 32 (1): 141-44. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2010.03.014>.
- Gima, Hirotaka, et Tomohiko Nakamura. 2022. « Association between General Movements Assessment and Later Motor Delay (Excluding Cerebral Palsy) in Low-Birth-Weight Infants ». *Brain Sciences* 12 (6): 686. <https://doi.org/10.3390/brainsci12060686>.
- Girolami, Gay L., Takako Shiratori, et Alexander S. Aruin. 2011. « Anticipatory Postural Adjustments in Children with Hemiplegia and Diplegia ». *Journal of Electromyography and Kinesiology: Official Journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology* 21 (6): 988-97. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2011.08.013>.
- Glass, Stephen M., Lane Wildman, Cameron Brummitt, Kevin Ratchford, Grant M. Westbrook, et Adrian Aron. 2022. « Effects of Global Postural Alignment on Posture-Stabilizing Synergy and Intermuscular Coherence in Bipedal Standing ». *Experimental Brain Research* 240 (3): 841-51. <https://doi.org/10.1007/s00221-021-06291-6>.
- Gleiss, Andreas, Michael Lassi, Peter Blümel, Martin Borkenstein, Klaus Kapelari, Michael Mayer, Michael Schemper, et Gabriele Häusler. 2013. « Austrian height and body proportion references for children aged 4 to under 19 years ». *Annals of Human Biology* 40 (4): 324-32. <https://doi.org/10.3109/03014460.2013.776110>.
- Goble, Daniel J., Colleen A. Lewis, Edward A. Hurvitz, et Susan H. Brown. 2005. « Development of Upper Limb Proprioceptive Accuracy in Children and Adolescents ». *Human Movement Science* 24 (2): 155-70. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2005.05.004>.
- Goetschius, John, Mark A. Feger, Jay Hertel, et Joseph M. Hart. 2018. « Validating Center-of-Pressure Balance Measurements Using the MatScan® Pressure Mat ». *Journal of Sport Rehabilitation*, janvier, 1-5. <https://doi.org/10.1123/jsr.2017-0152>.
- González, Lucía, Juan Argüelles, Vicente González, Kristian Winge, Marta Iscar, Hugo Olmedillas, Miguel Blanco, et al. 2020. « Slackline Training in Children with Spastic Cerebral Palsy: A Randomized Clinical Trial ». *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17 (22): 8649. <https://doi.org/10.3390/ijerph17228649>.

- Gorgon, Edward James, Gilbert Madriaga, Minerva Gomez-Cailao, Levin Abdon, et Mary Boniquit. 2014. « Reliability and Feasibility of the Four Square Step Test for Use in Children with Cerebral Palsy: A Pilot Study ». *Internet Journal of Allied Health Sciences and Practice*. <https://doi.org/10.46743/1540-580X/2014.1479>.
- Gough, Martin, et Adam P. Shortland. 2012. « Could Muscle Deformity in Children with Spastic Cerebral Palsy Be Related to an Impairment of Muscle Growth and Altered Adaptation? » *Developmental Medicine and Child Neurology* 54 (6): 495-99. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2012.04229.x>.
- Graham, David, Kristian Aquilina, Stephanie Cawker, Simon Paget, et Neil Wimalasundera. 2016. « Single-Level Selective Dorsal Rhizotomy for Spastic Cerebral Palsy ». *Journal of Spine Surgery (Hong Kong)* 2 (3): 195-201. <https://doi.org/10.21037/jss.2016.08.08>.
- Graham, David, Simon P. Paget, et Neil Wimalasundera. 2019. « Current Thinking in the Health Care Management of Children with Cerebral Palsy ». *The Medical Journal of Australia* 210 (3): 129-35. <https://doi.org/10.5694/mja2.12106>.
- Graham, H. Kerr. 2005. « Classifying Cerebral Palsy ». *Journal of Pediatric Orthopedics* 25 (1): 127-28. <https://doi.org/10.1097/00004694-200501000-00026>.
- Graham, H. Kerr, K. Roger Aoki, Ilona Autti-Rämö, Roslyn N Boyd, Mauricio R Delgado, Deborah J Gaebler-Spira, Mark E Gormley, et al. 2000. « Recommendations for the Use of Botulinum Toxin Type A in the Management of Cerebral Palsy ». *Gait & Posture* 11 (1): 67-79. [https://doi.org/10.1016/S0966-6362\(99\)00054-5](https://doi.org/10.1016/S0966-6362(99)00054-5).
- Graham, H. Kerr, Adrienne Harvey, Jillian Rodda, Gary R. Nattrass, et Marinis Pirpiris. 2004. « The Functional Mobility Scale (FMS) ». *Journal of Pediatric Orthopedics* 24 (5): 514-20. <https://doi.org/10.1097/00004694-200409000-00011>.
- Graham, H. Kerr, Peter Rosenbaum, Nigel Paneth, Bernard Dan, Jean-Pierre Lin, Diane L. Damiano, Jules G. Becher, et al. 2016. « Cerebral Palsy ». *Nature Reviews. Disease Primers* 2: 15082. <https://doi.org/10.1038/nrdp.2015.82>.
- Graham, H. Kerr, Pam Thomason, Kate Willoughby, Tandy Hastings-Ison, Renee Van Stralen, Benan Dala-Ali, Peter Wong, et Erich Rutz. 2021. « Musculoskeletal pathology in cerebral palsy: A classification system and reliability study ». *Children* 8 (3): 252.
- Greene, Amanda K. 2021. « Cerebral Palsy and the Data of Pain ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 63 (9): 1012. <https://doi.org/10.1111/dmcn.14877>.
- Greene, W B. 1994. « Genu Varum and Genu Valgum in Children ». *Instructional Course Lectures* 43 (janvier): 151-59.
- Gunel. 2009. « Relationship among the Manual Ability Classification System (MACS), the Gross Motor Function Classification System (GMFCS), and the functional status (WeeFIM) in children with spastic cerebral palsy | SpringerLink ». <https://link.springer.com/article/10.1007/s00431-008-0775-1>.
- Haas, G., H. C. Diener, H. Rapp, et J. Dichgans. 1989. « Development of Feedback and Feedforward Control of Upright Stance ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 31 (4): 481-88. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.1989.tb04026.x>.
- Hafer, Jocelyn F., Mark W. Lenhoff, Jinsup Song, Joanne M. Jordan, Marian T. Hannan, et Howard J. Hillstrom. 2013. « Reliability of Plantar Pressure Platforms ». *Gait & Posture* 38 (3): 544-48. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2013.01.028>.
- Hägglund, Gunnar, Katina Pettersson, Tomasz Czuba, Måns Persson-Bunke, et Elisabet Rodby-Bousquet. 2018. « Incidence of scoliosis in cerebral palsy ». *Acta Orthopaedica* 89 (4): 443-47. <https://doi.org/10.1080/17453674.2018.1450091>.
- Hagio, Shota, Akihiko Ishihara, Masahiro Terada, Hiroko Tanabe, Benio Kibushi, Akira Higashibata, Shin Yamada, et al. 2022. « Muscle Synergies of Multidirectional Postural Control in Astronauts on Earth after a Long-Term Stay in Space ». *Journal of Neurophysiology* 127 (5): 1230-39. <https://doi.org/10.1152/jn.00232.2021>.

- Håkstad, Ragnhild B., Gunn Kristin Øberg, Gay L. Girolami, et Stacey C. Dusing. 2022. « Enactive Explorations of Children's Sensory-Motor Play and Therapeutic Handling in Physical Therapy ». *Frontiers in Rehabilitation Sciences* 3: 994804. <https://doi.org/10.3389/fresc.2022.994804>.
- Haley, Stephen M., Wendy J. Coster, Ying-Chia Kao, Helene M. Dumas, Maria A. Fragala-Pinkham, Jessica M. Kramer, Larry H. Ludlow, et Richard Moed. 2010. « Lessons from Use of the Pediatric Evaluation of Disability Inventory (PEDI): Where Do We Go From Here? » *Pediatric physical therapy : the official publication of the Section on Pediatrics of the American Physical Therapy Association* 22 (1): 69-75. <https://doi.org/10.1097/PEP.0b013e3181cbfbf6>.
- Hancock, Graeme Ethan, Tracey Hepworth, et Kevin Wembridge. 2018. « Accuracy and Reliability of Knee Goniometry Methods ». *Journal of Experimental Orthopaedics* 5 (1): 46. <https://doi.org/10.1186/s40634-018-0161-5>.
- Handsfield, Geoffrey G., Sian Williams, Stephanie Khuu, Glen Lichtwark, et N. Susan Stott. 2022. « Muscle Architecture, Growth, and Biological Remodelling in Cerebral Palsy: A Narrative Review ». *BMC Musculoskeletal Disorders* 23 (1): 233. <https://doi.org/10.1186/s12891-022-05110-5>.
- Hansen, Colby, Dan Cushman, Nicholas Anderson, Wei Chen, Christine Cheng, Shirley D. Hon, et Man Hung. 2016. « A Normative Dataset of the Balance Error Scoring System in Children Aged Between 5 and 14 ». *Clinical Journal of Sport Medicine: Official Journal of the Canadian Academy of Sport Medicine* 26 (6): 497-501. <https://doi.org/10.1097/JSM.0000000000000285>.
- Hansen, Colby, Dan Cushman, Wei Chen, Jerry Bounsanga, et Man Hung. 2017. « Reliability Testing of the Balance Error Scoring System in Children Between the Ages of 5 and 14 ». *Clinical Journal of Sport Medicine: Official Journal of the Canadian Academy of Sport Medicine* 27 (1): 64-68. <https://doi.org/10.1097/JSM.0000000000000293>.
- Hansen, Lisbeth, Katrine Thingholm Erhardsen, Jesper Bencke, Stig Peter Magnusson, et Derek John Curtis. 2018. « The Reliability of the Segmental Assessment of Trunk Control (SATCo) in Children with Cerebral Palsy ». *Physical & Occupational Therapy in Pediatrics* 38 (3): 291-304. <https://doi.org/10.1080/01942638.2017.1337662>.
- Hao, Zengming, Yi Yang, Anke Hua, Ying Gao, et Jian Wang. 2021. « Age-Related Changes in Standing Balance in Preschoolers Using Traditional and Nonlinear Methods ». *Frontiers in Physiology* 12: 625553. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.625553>.
- Harb, Andrew, et Stephen Kishner. 2020. « Modified Ashworth Scale ». In *StatPearls*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK554572/>.
- Harvey, Adrienne R., Meg E. Morris, H. Kerr Graham, Rory Wolfe, et Richard Baker. 2010. « Reliability of the Functional Mobility Scale for Children with Cerebral Palsy ». *Physical & Occupational Therapy In Pediatrics* 30 (2): 139-49. <https://doi.org/10.3109/01942630903454930>.
- HAS. 2020. « Troubles du neurodéveloppement - Repérage et orientation des enfants à risque ». Haute Autorité de Santé. 2020. [https://www.has-sante.fr/jcms/p\\_3161334/fr/troubles-du-neurodeveloppement-reperage-et-orientation-des-enfants-a-risque](https://www.has-sante.fr/jcms/p_3161334/fr/troubles-du-neurodeveloppement-reperage-et-orientation-des-enfants-a-risque).
- HAS. 2021a. « Rééducation et réadaptation de la fonction motrice de l'appareil locomoteur des personnes diagnostiquées de paralysie cérébrale ». Haute Autorité de Santé. 2021. [https://www.has-sante.fr/jcms/p\\_3166294/fr/reeducation-et-readaptation-de-la-fonction-motrice-de-l-appareil-locomoteur-des-personnes-diagnostiquees-de-paralysie-cerebrale](https://www.has-sante.fr/jcms/p_3166294/fr/reeducation-et-readaptation-de-la-fonction-motrice-de-l-appareil-locomoteur-des-personnes-diagnostiquees-de-paralysie-cerebrale).
- HAS. 2021b. « Rééducation et réadaptation de la fonction motrice de l'appareil locomoteur des personnes diagnostiquées de paralysie cérébrale ». [https://www.has-sante.fr/jcms/p\\_3166294/fr/reeducation-et-readaptation-de-la-fonction-motrice-de-l-appareil-locomoteur-des-personnes-diagnostiquees-de-paralysie-cerebrale](https://www.has-sante.fr/jcms/p_3166294/fr/reeducation-et-readaptation-de-la-fonction-motrice-de-l-appareil-locomoteur-des-personnes-diagnostiquees-de-paralysie-cerebrale).
- Hattori, Komei, Toshie Hirohara, et Takashi Satake. 2011. « Body proportion chart for evaluating changes in stature, sitting height and leg length in children and adolescents ». *Annals of Human Biology* 38 (5): 556-60. <https://doi.org/10.3109/03014460.2011.577456>.

- Hay, L., et C. Redon. 1999. « Feedforward versus Feedback Control in Children and Adults Subjected to a Postural Disturbance ». *Experimental Brain Research* 125 (2): 153-62. <https://doi.org/10.1007/s002210050670>.
- Head, H., et G. Holmes. 1911. « Sensory Disturbances from Cerebral Lesions. Brain ». *Brain* 34, 102-254. [https://www.scirp.org/\(S\(lz5mqp453edsnp55rrgjt55\)\)/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2261239](https://www.scirp.org/(S(lz5mqp453edsnp55rrgjt55))/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2261239).
- Heidt, Christoph, Matia Vrankovic, Alejandro Mendoza, Karsten Hollander, Thomas Dreher, et Matthias Rueger. 2021. « Simplified Digital Balance Assessment in Typically Developing School Children ». *Gait & Posture* 84 (février): 389-94. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.01.005>.
- Heyrman, Lieve, Guy Molenaers, Kaat Desloovere, Geert Verheyden, Jos De Cat, Elegast Monbaliu, et Hilde Feys. 2011. « A Clinical Tool to Measure Trunk Control in Children with Cerebral Palsy: The Trunk Control Measurement Scale ». *Research in Developmental Disabilities* 32 (6): 2624-35. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.06.012>.
- Hill, Bridget, Beverly Eldridge, et Gavin Williams. 2022. « Construct Validity of the Revised High-Level Mobility Assessment Tool for Children Who Are Developing Typically ». *Physical Therapy* 102 (8): pzac076. <https://doi.org/10.1093/ptj/pzac076>.
- Hollung, Sandra Julsen, Gunnar Hägglund, Mark S. Gaston, Abdu Kedir Seid, Stian Lydersen, Ann I. Alriksson-Schmidt, et Guro L. Andersen. 2021. « Point Prevalence and Motor Function of Children and Adolescents with Cerebral Palsy in Scandinavia and Scotland: A CP-North Study ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 63 (6): 721-28. <https://doi.org/10.1111/dmcn.14764>.
- Horak, F. B., H. C. Diener, et L. M. Nashner. 1989. « Influence of central set on human postural responses ». *Journal of Neurophysiology* 62 (4): 841-53. <https://doi.org/10.1152/jn.1989.62.4.841>.
- Horak, F. B., et L. M. Nashner. 1986. « Central Programming of Postural Movements: Adaptation to Altered Support-Surface Configurations ». *Journal of Neurophysiology* 55 (6): 1369-81.
- Horak, FB, et SP Moore. 1993. « The Effect of Prior Leaning on Human Postural Responses ». *Gait & Posture* 1 (4): 203-10. [https://doi.org/10.1016/0966-6362\(93\)90047-5](https://doi.org/10.1016/0966-6362(93)90047-5).
- Horsch, Axel, Marco Götz, Andreas Geisbüsch, Nicholas Beckmann, Stefanos Tsitlakidis, Gregor Berrische, et Matthias Klotz. 2019. « Prevalence and Classification of Equinus Foot in Bilateral Spastic Cerebral Palsy ». *World Journal of Pediatrics: WJP* 15 (3): 276-80. <https://doi.org/10.1007/s12519-019-00238-2>.
- Houwen, S., C. Visscher, K. a. P. M. Lemmink, et E. Hartman. 2008. « Motor Skill Performance of School-Age Children with Visual Impairments ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 50 (2): 139-45. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2007.02016.x>.
- Hussain, Abul. 2021. « Growth and Development of Children ». SSRN Scholarly Paper. Rochester, NY. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3771757>.
- Hytönen, Malta, Ilmari Pyykkö, Heikki Aalto, et Jukka Starck. 1993. « Postural Control and Age ». *Acta Oto-Laryngologica* 113 (2): 119-22. <https://doi.org/10.3109/00016489309135778>.
- Imms, Christine. 2008. « Review of the Children's Assessment of Participation and Enjoyment and the Preferences for Activity of Children ». *Physical & Occupational Therapy In Pediatrics* 28 (4): 389-404. <https://doi.org/10.1080/01942630802307135>.
- Imms, Christine, Gillian King, Annette Majnemer, Lisa Avery, Lisa Chiarello, Robert Palisano, Margo Orlin, et Mary Law. 2017. « Leisure Participation–Preference Congruence of Children with Cerebral Palsy: A Children's Assessment of Participation and Enjoyment International Network Descriptive Study ». *Developmental Medicine & Child Neurology* 59 (4): 380-87. <https://doi.org/10.1111/dmcn.13302>.
- Ionescu, E., C. Dubreuil, et C. Ferber-Viart C. 2005. « [Physiological changes in balance control of adults aged 20 to 60 years assessed with Equitest] ». *Annales D'oto-Laryngologie Et De Chirurgie*

- Cervico Faciale: Bulletin De La Societe D'oto-Laryngologie Des Hopitaux De Paris* 122 (5): 231-35. [https://doi.org/10.1016/s0003-438x\(05\)82354-0](https://doi.org/10.1016/s0003-438x(05)82354-0).
- Isableu, B., T. Ohlmann, J. Cremieux, N. Vuillerme, B. Amblard, et M. A. Gresty. 2010. « Individual Differences in the Ability to Identify, Select and Use Appropriate Frames of Reference for Perceptuo-Motor Control ». *Neuroscience* 169 (3): 1199-1215. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2010.05.072>.
- Ivanenko, Yury, et Victor S. Gurfinkel. 2018. « Human postural control ». *Frontiers in neuroscience* 12: 171.
- Jackman, Michelle, Leanne Sakzewski, Catherine Morgan, Roslyn N Boyd, Sue E Brennan, Katherine Langdon, Rachel A M Toovey, Susan Greaves, Megan Thorley, et Iona Novak. 2022. « Interventions to Improve Physical Function for Children and Young People with Cerebral Palsy: International Clinical Practice Guideline ». *Developmental Medicine & Child Neurology* 64 (5): 536-49. <https://doi.org/10.1111/dmcn.15055>.
- Jacobs, Susan E., Marie Berg, Rod Hunt, William O. Tarnow-Mordi, Terrie E. Inder, et Peter G. Davis. 2013. « Cooling for Newborns with Hypoxic Ischaemic Encephalopathy ». *The Cochrane Database of Systematic Reviews* 2013 (1): CD003311. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD003311.pub3>.
- Jaeschke, R., J. Singer, et G. H. Guyatt. 1989. « Measurement of Health Status. Ascertaining the Minimal Clinically Important Difference ». *Controlled Clinical Trials* 10 (4): 407-15. [https://doi.org/10.1016/0197-2456\(89\)90005-6](https://doi.org/10.1016/0197-2456(89)90005-6).
- Jantakat, Chanada, Sirinun Ramrit, Alongkot Emasithi, et Wantana Siritaratiwat. 2014. « Capacity of Adolescents with Cerebral Palsy on Paediatric Balance Scale and Berg Balance Scale ». *Research in Developmental Disabilities* 36C (octobre): 72-77. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2014.09.016>.
- Jeka, John J., Kelvin S. Oie, et Tim Kiemel. 2008. « Asymmetric Adaptation with Functional Advantage in Human Sensorimotor Control ». *Experimental Brain Research* 191 (4): 453-63. <https://doi.org/10.1007/s00221-008-1539-x>.
- Jeon, Yong-Jin, et Gyoung-Mo Kim. 2016. « Comparison of the Psychometric Properties of Two Balance Scales in Children with Cerebral Palsy ». *Journal of Physical Therapy Science* 28 (12): 3432-34. <https://doi.org/10.1589/jpts.28.3432>.
- Jiang, Yu, Gang Liu, Jing-Pei Ren, Yi Zhao, Hui-Zhong Bai, Tuo Zhao, Lin Xu, et Xiao-Hong Mu. 2023. « Systematic Evaluation of the Efficacy and Safety of Botulinum Toxin Type A in the Treatment of Spastic Cerebral Palsy ». *Life Research* 6 (2): 8. <https://doi.org/10.53388/LR20230008>.
- Johnson, Charlotte, Ann Hallemans, Mieke Goetschalckx, Pieter Meyns, Eugene Rameckers, Katrijn Klingels, et Evi Verbecque. 2023. « Psychometric Properties of Functional Postural Control Tests in Children: A Systematic Review ». *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine* 66 (4): 101729. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2022.101729>.
- Jones, Samuel A., et Uta Noppeney. 2021. « Ageing and Multisensory Integration: A Review of the Evidence, and a Computational Perspective ». *Cortex* 138 (mai): 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2021.02.001>.
- Jung, Hee-Kyoung, EunJung Chung, et Byoung-Hee Lee. 2017. « A Comparison of the Balance and Gait Function between Children with Down Syndrome and Typically Developing Children ». *Journal of Physical Therapy Science* 29 (1): 123-27. <https://doi.org/10.1589/jpts.29.123>.
- Jung, Hyerim, et Young-Eun Choi. 2022. « The Psychometric Properties of the Trunk Impairment Scale in Children with Cerebral Palsy ». *Children (Basel, Switzerland)* 9 (3): 435. <https://doi.org/10.3390/children9030435>.
- Kahraman, Aysu, Kübra Seyhan, Ünal Değer, Seval Kutlutürk, et Akmer Mutlu. 2016. « Should Botulinum Toxin A Injections Be Repeated in Children with Cerebral Palsy? A Systematic Review ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 58 (9): 910-17. <https://doi.org/10.1111/dmcn.13135>.
- Kakooza-Mwesige, Angelina, Carin Andrews, Stefan Peterson, Fred Wabwire Mangen, Ann Christin Eliasson, et Hans Forssberg. 2017. « Prevalence of Cerebral Palsy in Uganda: A Population-



- Based Study ». *The Lancet. Global Health* 5 (12): e1275-82. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(17\)30374-1](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(17)30374-1).
- Kara, Ozgun Kaya, Ceren Gursen, Sebahat Yaprak Cetin, Elif Nur Tascioglu, Seda Muftuoglu, et Diane L. Damiano. 2022. « The Effects of Power Exercises on Body Structure and Function, Activity and Participation in Children with Cerebral Palsy: An ICF-Based Systematic Review ». *Disability and Rehabilitation*, octobre, 1-14. <https://doi.org/10.1080/09638288.2022.2138575>.
- Kasai, Tatsuya, et Tsuneo Taga. 1992. « Effects of varying load conditions on the organization of postural adjustments during voluntary arm flexion ». *Journal of Motor Behavior* 24: 359-65. <https://doi.org/10.1080/00222895.1992.9941632>.
- Kedem, Paz, et David M. Scher. 2015. « Foot Deformities in Children with Cerebral Palsy ». *Current Opinion in Pediatrics* 27 (1): 67. <https://doi.org/10.1097/MOP.0000000000000180>.
- Kelly, Barbara, Marilyn MacKay-Lyons, Susan Berryman, Joe Hyndman, et Ellen Wood. 2019. « Casting Protocols Following BoNT-A Injections to Treat Spastic Hypertonia of the Triceps Surae in Children with Cerebral Palsy and Equinus Gait: A Randomized Controlled Trial ». *Physical & Occupational Therapy in Pediatrics* 39 (1): 77-93. <https://doi.org/10.1080/01942638.2018.1471015>.
- Kelso, J. A., K. G. Holt, P. Rubin, et P. N. Kugler. 1981. « Patterns of Human Interlimb Coordination Emerge from the Properties of Non-Linear, Limit Cycle Oscillatory Processes: Theory and Data ». *Journal of Motor Behavior* 13 (4): 226-61.
- Keogh, Justin W. L., Alistair Cox, Sarah Anderson, Bernard Liew, Alicia Olsen, Ben Schram, et James Furness. 2019. « Reliability and Validity of Clinically Accessible Smartphone Applications to Measure Joint Range of Motion: A Systematic Review ». *PLOS ONE* 14 (5): e0215806. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215806>.
- Khandaker, Gulam, Mohammad Muhit, Tasneem Karim, Hayley Smithers-Sheedy, Iona Novak, Cheryl Jones, et Nadia Badawi. 2019. « Epidemiology of Cerebral Palsy in Bangladesh: A Population-Based Surveillance Study ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 61 (5): 601-9. <https://doi.org/10.1111/dmcn.14013>.
- Kiefer, Adam W., Cortney N. Armitano-Lago, Brian L. Cone, Scott Bonnette, Christopher K. Rhea, Sarah Cummins-Sebree, et Michael A. Riley. 2021. « Postural Control Development from Late Childhood through Young Adulthood ». *Gait & Posture* 86 (mars): 169-73. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.02.030>.
- Kim, Do-Hyun, Duk-Hyun An, et Won-Gyu Yoo. 2020. « Reliability, Standard Error of Measurement, and Minimal Detectable Change of the Star Excursion Balance Test in Children with Cerebral Palsy ». *Journal of Back and Musculoskeletal Rehabilitation* 33 (6): 909-12. <https://doi.org/10.3233/BMR-170863>.
- Kim, Gyoung-mo. 2016. « Comparison of the pediatric balance scale and Fullerton advanced balance scale for predicting falls in children with cerebral palsy ». *Physical Therapy Korea* 23 (4): 63-70.
- Kim, Heakyung, et Kat Kolaski. 2021. « Is Botulinum Toxin Type A More Effective and Safer than Other Treatments for the Management of Lower Limb Spasticity in Children with Cerebral Palsy? A Cochrane Review Summary with Commentary ». *NeuroRehabilitation* 49 (1): 161-64. <https://doi.org/10.3233/NRE-218003>.
- Kim, Seong-Gil, et Wan-Soo Kim. 2018. « Effect of Ankle Range of Motion (ROM) and Lower-Extremity Muscle Strength on Static Balance Control Ability in Young Adults: A Regression Analysis ». *Medical Science Monitor: International Medical Journal of Experimental and Clinical Research* 24 (mai): 3168-75. <https://doi.org/10.12659/MSM.908260>.
- King, Susanne, Rachel Teplicky, Gillian King, et Peter Rosenbaum. 2004. « Family-Centered Service for Children With Cerebral Palsy and Their Families: A Review of the Literature ». *Seminars in Pediatric Neurology*, Current Perspectives in Cerebral Palsy, 11 (1): 78-86. <https://doi.org/10.1016/j.spen.2004.01.009>.
- Kingma, Herman, Gerome C. Gauchard, Catherine De Waele, Christian Van Nechel, Alexandre Bisdorff, Alain Yelnik, Mans Magnusson, et Philippe P. Perrin. 2011. « Stocktaking on the development of posturography for clinical use ». *Journal of Vestibular Research* 21 (3): 117-25.

- Klaewkasikum, Krongkaew, Tanyaporn Patathong, Patarawan Woratanarat, Thira Woratanarat, Kunlawat Thadanipon, Sasivimol Rattanasiri, et Ammarin Thakkinstian. 2022. « Efficacy of Conservative Treatment for Spastic Cerebral Palsy Children with Equinus Gait: A Systematic Review and Meta-Analysis ». *Journal of Orthopaedic Surgery and Research* 17 (1): 411. <https://doi.org/10.1186/s13018-022-03301-3>.
- Kleim, Jeffrey A., et Theresa A. Jones. 2008. « Principles of Experience-Dependent Neural Plasticity: Implications for Rehabilitation after Brain Damage ». *Journal of Speech, Language, and Hearing Research: JSLHR* 51 (1): S225-239. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2008/018\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2008/018)).
- Klein, Cliff S., Ping Zhou, et Christina Marciniak. 2015. « Excitability Properties of Motor Axons in Adults with Cerebral Palsy ». *Frontiers in Human Neuroscience* 9: 329. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00329>.
- Ko, Ara, Juhyun Kong, Furkat Samadov, Akmal Mukhamedov, Young Mi Kim, Yun-Jin Lee, et Sang Ook Nam. 2020. « Bone Health in Pediatric Patients with Neurological Disorders ». *Annals of Pediatric Endocrinology & Metabolism* 25 (1): 15-23. <https://doi.org/10.6065/apem.2020.25.1.15>.
- Konor, Megan M., Sam Morton, Joan M. Eckerson, et Terry L. Grindstaff. 2012. « Reliability of Three Measures of Ankle Dorsiflexion Range of Motion ». *International Journal of Sports Physical Therapy* 7 (3): 279-87.
- Korzeniewski, Steven J., Jaime Slaughter, Madeleine Lenski, Peterson Haak, et Nigel Paneth. 2018. « The Complex Aetiology of Cerebral Palsy ». *Nature Reviews. Neurology* 14 (9): 528-43. <https://doi.org/10.1038/s41582-018-0043-6>.
- Kruse, Annika, Christian Schranz, Martin Svehlik, et Markus Tilp. 2017. « Mechanical Muscle and Tendon Properties of the Plantar Flexors Are Altered Even in Highly Functional Children with Spastic Cerebral Palsy ». *Clinical Biomechanics* 50 (décembre): 139-44. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2017.10.019>.
- Kruse, Annika, Christian Schranz, Markus Tilp, et Martin Svehlik. 2018. « Muscle and Tendon Morphology Alterations in Children and Adolescents with Mild Forms of Spastic Cerebral Palsy ». *BMC Pediatrics* 18 (1): 156. <https://doi.org/10.1186/s12887-018-1129-4>.
- Kugler, Peter N., J. A. Scott Kelso, et M. T. Turvey. 1980. « 1 On the Concept of Coordinative Structures as Dissipative Structures: I. Theoretical Lines of Convergence\*\*This Work Was Supported by NIH Grants HD 01994, NS 13617 and AM 25814 ». In *Advances in Psychology*, édité par George E. Stelmach et Jean Requin, 1:3-47. Tutorials in Motor Behavior. North-Holland. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)61936-6](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)61936-6).
- Kumai, Ken, Yumi Ikeda, Katsuya Sakai, Keisuke Goto, Kenji Morikawa, et Keiichirou Shibata. 2022. « Brain and Muscle Activation Patterns during Postural Control Affect Static Postural Control ». *Gait & Posture* 96 (juillet): 102-8. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2022.05.017>.
- Kumar, Senthil N. S., Baharudin Omar, Ohnmar Htwe, Leonard H. Joseph, Jagannathan Krishnan, Ali Jafarzedah Esfehiani, et Lee L. Min. 2014. « Reliability, Agreement, and Validity of Digital Weighing Scale with MatScan in Limb Load Measurement ». *Journal of Rehabilitation Research and Development* 51 (4): 591-98. <https://doi.org/10.1682/JRRD.2013.07.0166>.
- Kuo, Keith T., Bradley C. Hunter, Mizuho Obayashi, Joshua Lider, Masaru Teramoto, Melissa Cortez, et Colby Hansen. 2021. « Novice vs Expert Inter-Rater Reliability of the Balance Error Scoring System in Children between the Ages of 5 and 14 ». *Gait & Posture* 86 (février): 13-16. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.02.026>.
- Kwon, Hae-Yeon, et So-Yoon Ahn. 2016. « Correlation between the Gross Motor Performance Measurement and Pediatric Balance Scale with Respect to Movement Disorder in Children with Cerebral Palsy ». *Journal of Physical Therapy Science* 28 (8): 2279-83. <https://doi.org/10.1589/jpts.28.2279>.
- Labrom, Robert D. 2007. « Growth and Maturation of the Spine from Birth to Adolescence ». *JBJS* 89 (suppl\_1): 3. <https://doi.org/10.2106/JBJS.F.01236>.
- Laessoe, Uffe, Camilla Bille Larsen, Line Noerkjaer Schunck, Line Jensen Lehmann, et Halla Iversen. 2019. « Age Related Differences in Balance Approached by a Novel Dual-Task Test of

- Anticipatory Postural Control Strategies ». *PloS One* 14 (6): e0218371. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218371>.
- LaForme Fiss, Alyssa, Sarah Westcott McCoy, Doreen Bartlett, Lisa Avery, Steven E Hanna, et On Track Study Team. 2019. « Developmental Trajectories for the Early Clinical Assessment of Balance by Gross Motor Function Classification System Level for Children With Cerebral Palsy ». *Physical Therapy* 99 (2): 217-28. <https://doi.org/10.1093/ptj/pzy132>.
- Lance, J. W. 1980. « The Control of Muscle Tone, Reflexes, and Movement: Robert Wartenberg Lecture ». *Neurology* 30 (12): 1303-13. <https://doi.org/10.1212/wnl.30.12.1303>.
- Le Métayer, M. 2010. « Qu'en est-il de l'examen clinique en infirmité motrice cérébrale (paralysie cérébrale) – Quelles perspectives rééducatives ? » *Motricité Cérébrale: Réadaptation, Neurologie du Développement* 31 (4): 152-63. <https://doi.org/10.1016/j.motcer.2010.10.003>.
- Ledebt, A., B. Brill, et Y. Brenière. 1998. « The Build-up of Anticipatory Behaviour. An Analysis of the Development of Gait Initiation in Children ». *Experimental Brain Research* 120 (1): 9-17. <https://doi.org/10.1007/s002210050372>.
- Lee, Dae-Yeon. 2019. « Differences of the ankle plantar flexor length in typically developing children and children with spastic hemiplegic cerebral palsy ». *Journal of Exercise Rehabilitation* 15 (3): 445-48. <https://doi.org/10.12965/jer.1938216.108>.
- Lee, David N., et Eric Aronson. 1974. « Visual Proprioceptive Control of Standing in Human Infants ». *Perception & Psychophysics* 15 (3): 529-32. <https://doi.org/10.3758/BF03199297>.
- Lee, Mark C., et Craig P. Ebersson. 2006. « Growth and Development of the Child's Hip ». *Orthopedic Clinics of North America* 37 (2): 119-32. <https://doi.org/10.1016/j.ocl.2005.12.001>.
- Leizerowitz, Gil, et Michal Katz-Leurer. 2017. « Feasibility, stability and validity of the four square step test in typically developed children and children with brain damage ». *Brain Injury* 31 (10): 1356-61. <https://doi.org/10.1080/02699052.2017.1332384>.
- Lenroot, Rhoshel K., et Jay N. Giedd. 2006. « Brain development in children and adolescents: Insights from anatomical magnetic resonance imaging ». *Neuroscience & Biobehavioral Reviews, Methodological and Conceptual Advances in the Study of Brain-Behavior Dynamics: A Multivariate Lifespan Perspective*, 30 (6): 718-29. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2006.06.001>.
- Leonard, Rebecca, Jane Sweeney, Diane Damiano, Kristie Bjornson, et Julie Ries. 2021. « Effects of Orthoses on Standing Postural Control and Muscle Activity in Children With Cerebral Palsy ». *Pediatric Physical Therapy: The Official Publication of the Section on Pediatrics of the American Physical Therapy Association* 33 (3): 129-35. <https://doi.org/10.1097/PEP.0000000000000802>.
- Liao, Hua-Fang, et Ai-Wen Hwang. 2003. « Relations of balance function and gross motor ability for children with cerebral palsy ». *Perceptual and motor skills* 96 (3\_suppl): 1173-84.
- Liao, Hua-Fang, Pai-Jun Mao, et Ai-Wen Hwang. 2001. « Test–retest reliability of balance tests in children with cerebral palsy ». *Developmental medicine and child neurology* 43 (3): 180-86.
- Lidbeck, Cecilia M., Elena M. Gutierrez-Farewik, Eva Broström, et Åsa Bartonek. 2014. « Postural Orientation During Standing in Children With Bilateral Cerebral Palsy ». *Pediatric Physical Therapy* 26 (2): 223. <https://doi.org/10.1097/PEP.0000000000000025>.
- Lieber, Richard L., et Jan Fridén. 2019. « Muscle contracture and passive mechanics in cerebral palsy ». *Journal of Applied Physiology* 126 (5): 1492-1501. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00278.2018>.
- Lindén, Olof, Gunnar Hägglund, Elisabet Rodby-Bousquet, et Philippe Wagner. 2019. « The Development of Spasticity with Age in 4,162 Children with Cerebral Palsy: A Register-Based Prospective Cohort Study ». *Acta Orthopaedica* 90 (3): 286-91. <https://doi.org/10.1080/17453674.2019.1590769>.
- Lintanf, Mael, Jean-Sébastien Bourseul, Laetitia Houx, Mathieu Lempereur, Sylvain Brochard, et Christelle Pons. 2018. « Effect of Ankle-Foot Orthoses on Gait, Balance and Gross Motor Function in Children with Cerebral Palsy: A Systematic Review and Meta-Analysis ». *Clinical Rehabilitation*, avril, 269215518771824. <https://doi.org/10.1177/0269215518771824>.

- Little, L. M., E. Dean, S. D. Tomchek, et W. Dunn. 2017. « Classifying Sensory Profiles of Children in the General Population ». *Child: Care, Health and Development* 43 (1): 81-88. <https://doi.org/10.1111/cch.12391>.
- Lloyd. 1950. « Principles of spinal reflex activity ». In *A textbook of physiology*, Fulton J.F. (ed.), WB Saunders Company, Philadelphia&London,. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/4413606/>.
- Lloyd-Esenkaya, Tayfun, Vanessa Lloyd-Esenkaya, Eamonn O'Neill, et Michael J. Proulx. 2020. « Multisensory Inclusive Design with Sensory Substitution ». *Cognitive Research: Principles and Implications* 5 (1): 37. <https://doi.org/10.1186/s41235-020-00240-7>.
- Lopes, Guilherme Henrique Ramos, et Ana Cristina de David. 2013. « Posturography in the analysis of postural control in children with cerebral palsy: a literature review ». *Fisioterapia e Pesquisa* 20: 97-102.
- Löwing, Kristina, Karin Thews, Yvonne Haglund-Åkerlind, et Elena M. Gutierrez-Farewik. 2017. « Effects of Botulinum Toxin-A and Goal-Directed Physiotherapy in Children with Cerebral Palsy GMFCS Levels I & II ». *Physical & Occupational Therapy In Pediatrics* 37 (3): 268-82. <https://doi.org/10.3109/01942638.2016.1150384>.
- Lubetzky-Vilnai, Anat, Tracy L. Jirikowic, et Sarah Westcott McCoy. 2011. « Investigation of the Dynamic Gait Index in Children: A Pilot Study ». *Pediatric Physical Therapy: The Official Publication of the Section on Pediatrics of the American Physical Therapy Association* 23 (3): 268-73. <https://doi.org/10.1097/PEP.0b013e318227cd82>.
- Lundkvist Josenby, Annika, Gun-Britt Jarnlo, Christina Gummesson, et Eva Nordmark. 2009. « Longitudinal Construct Validity of the GMFM-88 Total Score and Goal Total Score and the GMFM-66 Score in a 5-Year Follow-up Study ». *Physical Therapy* 89 (4): 342-50. <https://doi.org/10.2522/ptj.20080037>.
- MacKinnon, Colum D. 2018. « Chapter 1 - Sensorimotor Anatomy of Gait, Balance, and Falls ». In *Handbook of Clinical Neurology*, édité par Brian L. Day et Stephen R. Lord, 159:3-26. Balance, Gait, and Falls. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63916-5.00001-X>.
- Magnus, Rudolph. 1926. « On Some Results of Studies in the Physiology of Posture ».
- Mahmoudzadeh, Ashraf, Nouredin Nakhostin Ansari, Soofia Naghdi, Ehsan Ghasemi, Omid Motamedzadeh, Brandon S. Shaw, et Ina Shaw. 2021. « Role of Spasticity Severity in the Balance of Post-Stroke Patients ». *Frontiers in Human Neuroscience* 15: 783093. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.783093>.
- Majnemer, Annette, Michael Shevell, Mary Law, Rena Birnbaum, Gevorg Chilingaryan, Peter Rosenbaum, et Chantal Poulin. 2008. « Participation and Enjoyment of Leisure Activities in School-Aged Children with Cerebral Palsy ». *Developmental Medicine & Child Neurology* 50 (10): 751-58. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2008.03068.x>.
- Malak, Roksana, Anna Kostiukow, Agnieszka Krawczyk-Wasielewska, Ewa Mojs, et Włodzimierz Samborski. 2015. « Delays in Motor Development in Children with Down Syndrome ». *Medical Science Monitor: International Medical Journal of Experimental and Clinical Research* 21 (juillet): 1904-10. <https://doi.org/10.12659/MSM.893377>.
- Mallau, Sophie, Marianne Vaugoyeau, et Christine Assaiante. 2010. « Postural Strategies and Sensory Integration: No Turning Point between Childhood and Adolescence ». *PloS One* 5 (9). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013078>.
- Mani, Hiroki, Saori Miyagishima, Naoki Kozuka, Yuya Kodama, Kenta Takeda, et Tadayoshi Asaka. 2019. « Development of Postural Control during Single-Leg Standing in Children Aged 3-10 Years ». *Gait & Posture* 68: 174-80. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.11.024>.
- Marin, L., et B. G. Bardy. 2011. « Les coordinations posturales : Approches neuromusculaire et dynamique ». *Science & Motricité*, n° 74: 39-52. <https://doi.org/10.1051/sm/2011115>.
- Marin, Ludovic, Benoît G Bardy, Bernard Baumberger, Michelangelo Flückiger, et Thomas A Stoffregen. 1999. « Interaction between Task Demands and Surface Properties in the Control of Goal-Oriented Stance ». *Human Movement Science* 18 (1): 31-47. [https://doi.org/10.1016/S0167-9457\(98\)00032-3](https://doi.org/10.1016/S0167-9457(98)00032-3).

- Marsico, Petra, Lea Meier, Marietta L. van der Linden, Tom H. Mercer, et Hubertus J. A. van Hedel. 2022. « Psychometric Properties of Lower Limb Somatosensory Function and Body Awareness Outcome Measures in Children with Upper Motor Neuron Lesions: A Systematic Review ». *Developmental Neurorehabilitation* 25 (5): 314-27. <https://doi.org/10.1080/17518423.2021.2011976>.
- Martin, John H. 2005. « The Corticospinal System: From Development to Motor Control ». *The Neuroscientist* 11 (2): 161-73. <https://doi.org/10.1177/1073858404270843>.
- Massion, J., Marat Ioffe, Christina Schmitz, François Viallet, et Radka Gantcheva. 1999. « Acquisition of Anticipatory Postural Adjustments in a Bimanual Load-Lifting Task: Normal and Pathological Aspects ». *Experimental Brain Research* 128 (1): 229-35. <https://doi.org/10.1007/s002210050842>.
- Massion, Jean. 1992. « Movement, Posture and Equilibrium: Interaction and Coordination ». *Progress in Neurobiology* 38 (1): 35-56. [https://doi.org/10.1016/0301-0082\(92\)90034-C](https://doi.org/10.1016/0301-0082(92)90034-C).
- . 1994. « Postural Control System ». *Current Opinion in Neurobiology* 4 (6): 877-87. [https://doi.org/10.1016/0959-4388\(94\)90137-6](https://doi.org/10.1016/0959-4388(94)90137-6).
- Mathewson, Margie A., et Richard L. Lieber. 2015. « Pathophysiology of Muscle Contractures in Cerebral Palsy ». *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America* 26 (1): 57-67. <https://doi.org/10.1016/j.pmr.2014.09.005>.
- McCollum, Gin, et Todd K. Leen. 1989. « Form and Exploration of Mechanical Stability Limits in Erect Stance ». *Journal of Motor Behavior* 21 (3): 225-44. <https://doi.org/10.1080/00222895.1989.10735479>.
- McCoy, Sarah W., Doreen J. Bartlett, Allison Yocum, Lynn Jeffries, Alyssa L. Fiss, Lisa Chiarello, et Robert J. Palisano. 2014. « Development and Validity of the Early Clinical Assessment of Balance for Young Children with Cerebral Palsy ». *Developmental Neurorehabilitation* 17 (6): 375-83. <https://doi.org/10.3109/17518423.2013.827755>.
- McIlroy, William Evans, Darcy Claire Bishop, William Richard Staines, Aimee Jennifer Nelson, Brian Edward Maki, et John Dennis Brooke. 2003. « Modulation of Afferent Inflow during the Control of Balancing Tasks Using the Lower Limbs ». *Brain Research* 961 (1): 73-80. [https://doi.org/10.1016/s0006-8993\(02\)03845-3](https://doi.org/10.1016/s0006-8993(02)03845-3).
- McIntyre, Sarah, Shona Goldsmith, Annabel Webb, Virginie Ehlinger, Sandra Julsen Hollung, Karen McConnell, Catherine Arnaud, et al. 2022. « Global Prevalence of Cerebral Palsy: A Systematic Analysis ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 64 (12): 1494-1506. <https://doi.org/10.1111/dmcn.15346>.
- Meseguer-Henarejos, Ana-Belén, Julio Sánchez-Meca, José-Antonio López-Pina, et Ricardo Carles-Hernández. 2018. « Inter- and Intra-Rater Reliability of the Modified Ashworth Scale: A Systematic Review and Meta-Analysis ». *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine* 54 (4): 576-90. <https://doi.org/10.23736/S1973-9087.17.04796-7>.
- Mesure, S., et Lamendin. 2001. *Posture, pratique sportive et rééducation*. Médecine du sport. Issy-les-Moulineaux: Masson.
- Meyvaci, Seda Sertel, Turgut Meyvaci, Rengin Kosif, Murat Diramali, et Handan Ankarali. 2020. « Effect of Foot Anthropometric Measurements on Postural Stability ». *EXPERIMENTAL BIOMEDICAL RESEARCH* 3 (3): 176-90. <https://doi.org/10.30714/j-ebr.2020361056>.
- Micarelli, Alessandro, Andrea Viziano, Ivan Augimeri, Beatrice Micarelli, et Marco Alessandrini. 2020. « Age-Related Assessment of Postural Control Development: A Cross-Sectional Study in Children and Adolescents ». *Journal of Motor Behavior* 52 (4): 418-26. <https://doi.org/10.1080/00222895.2019.1643284>.
- Miller, Freeman. 2018. « Focal Management of Spasticity in Cerebral Palsy ». In *Cerebral Palsy*, édité par Freeman Miller, Steven Bachrach, Nancy Lennon, et Margaret O'Neil, 1-18. Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-50592-3\\_43-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-50592-3_43-1).
- Mills, Richard, Danielle Levac, et Heidi Sveistrup. 2018. « Kinematics and Postural Muscular Activity during Continuous Oscillating Platform Movement in Children and Adolescents with Cerebral Palsy ». *Gait & Posture* 66: 13-20. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.08.002>.

- Milne, Nikki, Michelle Miao, et Emma Beattie. 2020. « The Effects of Serial Casting on Lower Limb Function for Children with Cerebral Palsy: A Systematic Review with Meta-Analysis ». *BMC Pediatrics* 20 (1): 324. <https://doi.org/10.1186/s12887-020-02122-9>.
- Mirska, Anna, Katarzyna Cybula, Bożena Okurowska-Zawada, Wojciech Kułak, Elżbieta Dmitruk, Kamila Okulczyk, et Anna K. Kalinowska. 2014. « Use of Botulinum Toxin in the Treatment of Ankle Plantar Flexor Spasticity in Children with Cerebral Palsy ». *Journal of Pediatric Orthopedics. Part B* 23 (6): 517-22. <https://doi.org/10.1097/BPB.0000000000000098>.
- Missaoui, Besma, et Philippe Thoumie. 2013. « Balance Training in Ataxic Neuropathies. Effects on Balance and Gait Parameters ». *Gait & Posture* 38 (3): 471-76. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2013.01.017>.
- Molenaers, Guy, Anja Van Campenhout, Katrien Fagard, Jos De Cat, et Kaat Desloovere. 2010. « The Use of Botulinum Toxin A in Children with Cerebral Palsy, with a Focus on the Lower Limb ». *Journal of Children's Orthopaedics* 4 (3): 183-95. <https://doi.org/10.1007/s11832-010-0246-x>.
- Molnár, Zoltán, et Richard E. Brown. 2010. « Insights into the Life and Work of Sir Charles Sherrington ». *Nature Reviews Neuroscience* 11 (6): 429-36. <https://doi.org/10.1038/nrn2835>.
- Moreno, F. J., C. Caballero, et D. Barbado. 2022. « Postural Control Strategies Are Revealed by the Complexity of Fractional Components of COP ». *Journal of Neurophysiology* 127 (5): 1289-97. <https://doi.org/10.1152/jn.00426.2021>.
- Msall, M. E., K. DiGaudio, B. T. Rogers, S. LaForest, N. L. Catanzaro, J. Campbell, F. Wilczenski, et L. C. Duffy. 1994. « The Functional Independence Measure for Children (WeeFIM). Conceptual Basis and Pilot Use in Children with Developmental Disabilities ». *Clinical Pediatrics* 33 (7): 421-30. <https://doi.org/10.1177/000992289403300708>.
- Msall, Michael E., Kathleen DiGaudio, Linda C. Duffy, Suzanne LaForest, Susan Braun, et Carl V. Granger. 1994. « WeeFIM: Normative Sample of an Instrument for Tracking Functional Independence in Children ». *Clinical Pediatrics* 33 (7): 431-38. <https://doi.org/10.1177/000992289403300709>.
- Müller, B., K. Geißler, et O. Guntinas-Lichius. 2016. « [The Sensory Organization Test on the Equitest® posturography system] ». *Laryngo- Rhino- Otologie* 95 (9): 602-3. <https://doi.org/10.1055/s-0042-114542>.
- Müller, Steffen, Anja Carlsohn, Juliane Müller, Heiner Baur, et Frank Mayer. 2012. « Static and Dynamic Foot Characteristics in Children Aged 1–13 Years: A Cross-Sectional Study ». *Gait & Posture* 35 (3): 389-94. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2011.10.357>.
- Multani, Iqbal, Jamil Manji, Tandy Hastings-Ison, Abhay Khot, et Kerr Graham. 2019. « Botulinum Toxin in the Management of Children with Cerebral Palsy ». *Paediatric Drugs* 21 (4): 261-81. <https://doi.org/10.1007/s40272-019-00344-8>.
- Mus-Peters, Cindy T. R., Bionka M. A. Huisstede, Suzie Noten, Minou W. M. G. C. Hitters, Wilma M. A. van der Slot, et Rita J. G. van den Berg-Emons. 2019. « Low Bone Mineral Density in Ambulatory Persons with Cerebral Palsy? A Systematic Review ». *Disability and Rehabilitation* 41 (20): 2392-2402. <https://doi.org/10.1080/09638288.2018.1470261>.
- Mutlu. 2008. « Reliability of Ashworth and Modified Ashworth Scales in Children with Spastic Cerebral Palsy | BMC Musculoskeletal Disorders | Full Text ». <https://bmcmusculoskeletaldisord.biomedcentral.com/articles/10.1186/1471-2474-9-44>.
- Nahm, Nickolas J., H. Kerr Graham, Mark E. Gormley, et Andrew G. Georgiadis. 2018a. « Management of Hypertonia in Cerebral Palsy ». *Current Opinion in Pediatrics* 30 (1): 57-64. <https://doi.org/10.1097/MOP.0000000000000567>.
- . 2018b. « Management of Hypertonia in Cerebral Palsy ». *Current Opinion in Pediatrics* 30 (1): 57-64. <https://doi.org/10.1097/MOP.0000000000000567>.
- Naito, Eiichi, Tomoyo Morita, et Kaoru Amemiya. 2016. « Body Representations in the Human Brain Revealed by Kinesthetic Illusions and Their Essential Contributions to Motor Control and Corporeal Awareness ». *Neuroscience Research* 104 (mars): 16-30. <https://doi.org/10.1016/j.neures.2015.10.013>.

- Nandi, Raj, et Linda M. Luxon. 2008. « Development and Assessment of the Vestibular System ». *International Journal of Audiology* 47 (9): 566-77. <https://doi.org/10.1080/14992020802324540>.
- Nashner, L. M., et J. F. Peters. 1990. « Dynamic Posturography in the Diagnosis and Management of Dizziness and Balance Disorders ». *Neurologic Clinics* 8 (2): 331-49.
- Nashner, L. M., A. Shumway-Cook, et O. Marin. 1983. « Stance Posture Control in Select Groups of Children with Cerebral Palsy: Deficits in Sensory Organization and Muscular Coordination ». *Experimental Brain Research* 49 (3): 393-409.
- Nashner, L. M., C. L. Shupert, F. B. Horak, et F. O. Black. 1989. « Organization of Posture Controls: An Analysis of Sensory and Mechanical Constraints ». *Progress in Brain Research* 80: 411-18; discussion 395-397.
- Nashner, Lewis M. 1982. « Adaptation of human movement to altered environments ». *Trends in Neurosciences* 5 (10): 358-61. [https://doi.org/10.1016/0166-2236\(82\)90204-1](https://doi.org/10.1016/0166-2236(82)90204-1).
- Nashner, Lewis M., et Gin McCollum. 1985. « The organization of human postural movements: A formal basis and experimental synthesis ». *Behavioral and Brain Sciences* 8 (1): 135-72. <https://doi.org/10.1017/S0140525X00020008>.
- Näslund, A, G Sundelin, et H Hirschfeld. 2007. « Reach Performance and Postural Adjustments during Standing in Children with Severe Spastic Diplegia Using Dynamic Ankle-Foot Orthoses ». *Journal of Rehabilitation Medicine* 39 (9): 715-23. <https://doi.org/10.2340/16501977-0121>.
- National Guideline Alliance (UK). 2017. *Cerebral Palsy in under 25s: Assessment and Management*. National Institute for Health and Care Excellence: Guidelines. London: National Institute for Health and Care Excellence (NICE). <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK419326/>.
- Newell, K. M., P. N. Kugler, R. E. A. van Emmerik, et P. V. McDonald. 1989. « Search strategies and the acquisition of coordination ». In *Perspectives on the coordination of movement*, 85-122. Advances in psychology, 61. Oxford, England: North-Holland. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)60019-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)60019-9).
- Newman, Christopher John, Ann Kennedy, Michael Walsh, Timothy O'Brien, Bryan Lynch, et Owen Hensey. 2007. « A Pilot Study of Delayed versus Immediate Serial Casting after Botulinum Toxin Injection for Partially Reducible Spastic Equinus ». *Journal of Pediatric Orthopedics* 27 (8): 882-85. <https://doi.org/10.1097/BPO.0b013e31815b4d7d>.
- Newton, Isaac. 1687. « Philosophiæ naturalis principia mathematica ». [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Philosophi%C3%A6\\_naturalis\\_principia\\_mathematica&oldid=199795023](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Philosophi%C3%A6_naturalis_principia_mathematica&oldid=199795023).
- NICE. 2017. « Cerebral palsy in under 25 s: assessment and management (NICE Guideline NG62) | ADC Education & Practice Edition ». 2017. <https://ep.bmj.com/content/103/4/189.abstract>.
- Nicolini-Panisson, Renata D'Agostini, et Márcio Vinícius F. Donadio. 2013. « Timed "Up & Go" Test in Children and Adolescents ». *Revista Paulista De Pediatria: Orgao Oficial Da Sociedade De Pediatria De Sao Paulo* 31 (3): 377-83. <https://doi.org/10.1590/S0103-05822013000300016>.
- Niet, Mark de, Susanne T. de Bot, Bart P. C. van de Warrenburg, Vivian Weerdesteyn, et Alexander C. Geurts. 2015. « Functional Effects of Botulinum Toxin Type-A Treatment and Subsequent Stretching of Spastic Calf Muscles: A Study in Patients with Hereditary Spastic Paraplegia ». *Journal of Rehabilitation Medicine* 47 (2): 147-53. <https://doi.org/10.2340/16501977-1909>.
- Niznik, Theresa M., Dale Turner, et Teddy W. Worrell. 1996. « Functional Reach as a Measurement of Balance for Children with Lower Extremity Spasticity ». *Physical & Occupational Therapy In Pediatrics* 15 (3): 1-16. [https://doi.org/10.1080/J006v15n03\\_01](https://doi.org/10.1080/J006v15n03_01).
- Noé, Frédéric, et Thierry Paillard. 2016. « Bases biomécaniques du contrôle postural ». <https://hal.science/hal-02361661>.
- Norkin, Cynthia C., et D. Joyce White. 2016. *Measurement Of Joint Motion: A Guide To Goniometry*. F.A. Davis.
- Norris, Rosemary A., Elaine Wilder, et Jennifer Norton. 2008. « The Functional Reach Test in 3- to 5-Year-Old Children without Disabilities ». *Pediatric Physical Therapy: The Official Publication of*

- the Section on Pediatrics of the American Physical Therapy Association* 20 (1): 47-52. <https://doi.org/10.1097/PEP.0b013e31815ce63f>.
- Novak, Iona. 2014. « Evidence-Based Diagnosis, Health Care, and Rehabilitation for Children With Cerebral Palsy ». *Journal of Child Neurology* 29 (8): 1141-56. <https://doi.org/10.1177/0883073814535503>.
- Novak, Iona. 2020. « Therapy for Children with Cerebral Palsy: Who, What, and How Much? » *Developmental Medicine and Child Neurology* 62 (1): 17. <https://doi.org/10.1111/dmcn.14345>.
- Novak, Iona, Catherine Morgan, Michael Fahey, Megan Finch-Edmondson, Claire Galea, Ashleigh Hines, Katherine Langdon, et al. 2020. « State of the Evidence Traffic Lights 2019: Systematic Review of Interventions for Preventing and Treating Children with Cerebral Palsy ». *Current Neurology and Neuroscience Reports* 20 (2): 3. <https://doi.org/10.1007/s11910-020-1022-z>.
- Numanoğlu, Ayşe, et Mintaze Kerem Günel. 2012. « Intraobserver Reliability of Modified Ashworth Scale and Modified Tardieu Scale in the Assessment of Spasticity in Children with Cerebral Palsy ». *Acta Orthopaedica Et Traumatologica Turcica* 46 (3): 196-200. <https://doi.org/10.3944/aott.2012.2697>.
- O'Brien, Thomas D., Jane Noyes, Llinos Haf Spencer, Hans-Peter Kubis, Richard P. Hastings, et Rhiannon Whitaker. 2016. « Systematic Review of Physical Activity and Exercise Interventions to Improve Health, Fitness and Well-Being of Children and Young People Who Use Wheelchairs ». *BMJ Open Sport & Exercise Medicine* 2 (1): e000109. <https://doi.org/10.1136/bmjsem-2016-000109>.
- Oddie, S., D. J. Tuffnell, et W. McGuire. 2015. « Antenatal Magnesium Sulfate: Neuro-Protection for Preterm Infants ». *Archives of Disease in Childhood. Fetal and Neonatal Edition* 100 (6): F553-557. <https://doi.org/10.1136/archdischild-2014-307655>.
- Ogrodnik, Justyna, et Szczepan Piszczatowski. 2017. « Influence of Modified Muscle Morphology and Activity Pattern on the Results of Musculoskeletal System Modelling in Cerebral Palsy Patient ». *Acta of Bioengineering and Biomechanics* 19 (3): 63-75.
- Ohata, Koji, Tadao Tsuboyama, Taishi Haruta, Noriaki Ichihashi, Takeo Kato, et Takashi Nakamura. 2008. « Relation between Muscle Thickness, Spasticity, and Activity Limitations in Children and Adolescents with Cerebral Palsy ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 50 (2): 152-56. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2007.02018.x>.
- Olusanya, Bolajoko O., Melissa Gladstone, Scott M. Wright, Mijna Hadders-Algra, Nem-Yun Boo, M. K. C. Nair, Nihad Almasri, et al. 2022. « Cerebral Palsy and Developmental Intellectual Disability in Children Younger than 5 Years: Findings from the GBD-WHO Rehabilitation Database 2019 ». *Frontiers in Public Health* 10: 894546. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.894546>.
- Onis, M. de. 2008. « The WHO Child Growth Standards. » *Pediatric Nutrition in Practice*, 254-69. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20093037160>.
- Opheim, Arve, Reidun Jahnsen, Elisabeth Olsson, et Johan Kvalvik Stanghelle. 2012. « Balance in Relation to Walking Deterioration in Adults with Spastic Bilateral Cerebral Palsy ». *Physical Therapy* 92 (2): 279-88. <https://doi.org/10.2522/ptj.20100432>.
- Organisation mondiale de la Santé. 2020. *Lignes directrices de l'OMS sur l'activité physique et la sédentarité: en un coup d'oeil*. Genève: Organisation mondiale de la Santé. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/337003>.
- Oullier, Olivier, Benoît G. Bardy, Thomas A. Stoffregen, et Reinoud J. Bootsma. 2002. « Postural Coordination in Looking and Tracking Tasks ». *Human Movement Science* 21 (2): 147-67. [https://doi.org/10.1016/s0167-9457\(02\)00093-3](https://doi.org/10.1016/s0167-9457(02)00093-3).
- Oullier, Olivier, Benoît G. Bardy, Thomas A. Stoffregen, et Reinoud J. Bootsma. 2004. « Task-Specific Stabilization of Postural Coordination during Stance on a Beam ». *Motor Control* 8 (2): 174-87. <https://doi.org/10.1123/mcj.8.2.174>.
- Oullier, Olivier, Ludovic Marin, Thomas Stoffregen, Reinoud Bootsma, et Benoît Bardy. 2006. « Variability in Postural Coordination Dynamics ». In , 25-47. <https://doi.org/10.5040/9781492596851.ch-002>.



- Ozal, Cemil, Songul Aksoy, et Mintaze Kerem Gunel. 2022. « Influence of Lower Extremity Impairment and Trunk Control on Postural Control and Functional Mobility in Children with Spastic Cerebral Palsy ».
- Özal, Cemil, Songül Aksoy, et Mintaze Kerem Günel. 2022. « Postural Control Alterations in Children with Mild Forms of Spastic Cerebral Palsy ». *Pediatric Health, Medicine and Therapeutics* 13: 367-76. <https://doi.org/10.2147/PHMT.S378451>.
- Påhlman, Magnus, Christopher Gillberg, et Kate Himmelmann. 2021. « Autism and Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder in Children with Cerebral Palsy: High Prevalence Rates in a Population-Based Study ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 63 (3): 320-27. <https://doi.org/10.1111/dmcn.14736>.
- Paillard, Thierry. 2016. *Posture et équilibration humaines*. De Boeck Supérieur.
- Paleg, Ginny, et Roslyn Livingstone. 2022. « Evidence-Informed Clinical Perspectives on Postural Management for Hip Health in Children and Adults with Non-Ambulant Cerebral Palsy ». *Journal of Pediatric Rehabilitation Medicine* 15 (1): 39-48. <https://doi.org/10.3233/PRM-220002>.
- Palisano, Robert. 2008. « Content validity of the expanded and revised Gross Motor Function Classification System - Palisano - 2008 - Developmental Medicine & Child Neurology - Wiley Online Library ». <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1469-8749.2008.03089.x>.
- Palisano, Robert J., Lisa Avery, Jan Willem Gorter, Barbara Galuppi, et Sarah Westcott McCoy. 2018. « Stability of the Gross Motor Function Classification System, Manual Ability Classification System, and Communication Function Classification System ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 60 (10): 1026-32. <https://doi.org/10.1111/dmcn.13903>.
- Palisano, Robert, Peter Rosenbaum, Stephen Walter, Dianne Russell, Ellen Wood, et Barbara Galuppi. 1997. « Gross motor function classification system for cerebral palsy ». *Dev Med Child Neurol* 39 (4): 214-23.
- Panibatla, Sivatejaa, Vijaya Kumar, et Amitesh Narayan. 2017. « Relationship Between Trunk Control and Balance in Children with Spastic Cerebral Palsy: A Cross-Sectional Study ». *Journal of Clinical and Diagnostic Research: JCDR* 11 (9): YC05-8. <https://doi.org/10.7860/JCDR/2017/28388.10649>.
- Pantzar-Castilla, Evelina Hanna Sofia, Per Wretenberg, et Jacques Riad. 2021. « Knee Flexion Contracture Impacts Functional Mobility in Children with Cerebral Palsy with Various Degree of Involvement: A Cross-Sectional Register Study of 2,838 Individuals ». *Acta Orthopaedica* 92 (4): 472-78. <https://doi.org/10.1080/17453674.2021.1912941>.
- Papadelis, Christos, Banu Ahtam, Maria Nazarova, Donna Nimec, Brian Snyder, Patricia Ellen Grant, et Yoshio Okada. 2014. « Cortical Somatosensory Reorganization in Children with Spastic Cerebral Palsy: A Multimodal Neuroimaging Study ». *Frontiers in Human Neuroscience* 8. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnhum.2014.00725>.
- Papageorgiou, Eirini, Angela Nieuwenhuys, Ines Vandekerckhove, Anja Van Campenhout, Els Ortibus, et Kaat Desloovere. 2019. « Systematic Review on Gait Classifications in Children with Cerebral Palsy: An Update ». *Gait & Posture* 69: 209-23. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.01.038>.
- Park, Eun Sook, Dong-Wook Rha, Jun Ki Yoo, Sun Mi Kim, Won Hyuk Chang, et Sang Hyuk Song. 2010a. « Short-Term Effects of Combined Serial Casting and Botulinum Toxin Injection for Spastic Equinus in Ambulatory Children with Cerebral Palsy ». *Yonsei Medical Journal* 51 (4): 579-84. <https://doi.org/10.3349/ymj.2010.51.4.579>.
- Park, Eun Sook, Dong-Wook Rha, Jun Ki Yoo, Sun Mi Kim, Won Hyuk Chang, et Sang Hyuk Song. 2010b. « Short-Term Effects of Combined Serial Casting and Botulinum Toxin Injection for Spastic Equinus in Ambulatory Children with Cerebral Palsy ». *Yonsei Medical Journal* 51 (4): 579-84. <https://doi.org/10.3349/ymj.2010.51.4.579>.

- Park, Eun Sook, Eungeol Sim, Dong-Wook Rha, et Soojin Jung. 2014. « Architectural Changes of the Gastrocnemius Muscle after Botulinum Toxin Type A Injection in Children with Cerebral Palsy ». *Yonsei Medical Journal* 55 (5): 1406-12. <https://doi.org/10.3349/ymj.2014.55.5.1406>.
- Pascual-Pascual, Samuel Ignacio, Ignacio Pascual-Castroviejo, et Pedro J. Garcia Ruiz. 2011. « Treating Spastic Equinus Foot from Cerebral Palsy with Botulinum Toxin Type A: What Factors Influence the Results?: An Analysis of 189 Consecutive Cases ». *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation* 90 (7): 554-63. <https://doi.org/10.1097/PHM.0b013e31821f6c40>.
- Patel, Mekala Neelakantan, Karan Pandher, et Joav Merrick. 2020. « Cerebral Palsy in Children: A Clinical Overview ». *Translational Pediatrics* 9 (Suppl 1): S125-35. <https://doi.org/10.21037/tp.2020.01.01>.
- Patel, Rishi D., et Cynthia R. LaBella. 2022. « Contributions of PCSS, BESS, Tandem Gait, and Romberg Test for Identifying Balance Deficits in Pediatric Concussions ». *The Journal of Head Trauma Rehabilitation* 37 (2): E129-34. <https://doi.org/10.1097/HTR.0000000000000702>.
- Paulson, Andrea, et Jilda Vargus-Adams. 2017. « Overview of four functional classification systems commonly used in cerebral palsy ». *Children* 4 (4): 30.
- Pavão, Silvia L., Adriana N. Santos, Ana B. Oliveira, et Nelci A. C. F. Rocha. 2015. « Postural Control during Sit-to-Stand Movement and Its Relationship with Upright Position in Children with Hemiplegic Spastic Cerebral Palsy and in Typically Developing Children ». *Brazilian Journal of Physical Therapy* 19 (1): 18-25. <https://doi.org/10.1590/bjpt-rbf.2014.0069>.
- Pavão, Silvia Leticia. 2014. « Functional Balance and Gross Motor Function in Children with Cerebral Palsy ». *Research in Developmental Disabilities*, Research in Developmental Disabilities, 35 (10): 2278-83. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2014.05.024>.
- Pavão, Silvia Leticia, Kayo Andre F. Barbosa, Tatiana de Oliveira Sato, et Nelci Adriana Cicuto Ferreira Rocha. 2014. « Functional Balance and Gross Motor Function in Children with Cerebral Palsy ». *Research in Developmental Disabilities* 35 (10): 2278-83. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2014.05.024>.
- Pavão, Silvia Leticia, Ana Carolina de Campos, et Nelci Adriana Cicuto Ferreira Rocha. 2019. « Age-Related Changes in Postural Sway During Sit-to-Stand in Typical Children and Children with Cerebral Palsy ». *Journal of Motor Behavior* 51 (2): 185-92. <https://doi.org/10.1080/00222895.2018.1454396>.
- Pavão, Silvia Leticia, Adriana Neves Dos Santos, Ana Beatriz de Oliveira, et Nelci Adriana Cicuto Ferreira Rocha. 2014. « Functionality Level and Its Relation to Postural Control during Sitting-to-Stand Movement in Children with Cerebral Palsy ». *Research in Developmental Disabilities* 35 (2): 506-11. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2013.11.028>.
- Pavão, Sílvia Leticia, Davi Adiwardana Maeda, Carolina Corsi, Mariana Martins Dos Santos, Carolina Souza N. da Costa, Ana Carolina de Campos, et Nelci Adriana Cicuto Ferreira Rocha. 2019. « Discriminant Ability and Criterion Validity of the Trunk Impairment Scale for Cerebral Palsy ». *Disability and Rehabilitation* 41 (18): 2199-2205. <https://doi.org/10.1080/09638288.2018.1462410>.
- Pavão, Sílvia Leticia, et Nelci Adriana Cicuto Ferreira Rocha. 2017. « Sensory Processing Disorders in Children with Cerebral Palsy ». *Infant Behavior & Development* 46 (février): 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.infbeh.2016.10.007>.
- Pavão, Sílvia Leticia, Adriana Neves dos Santos, Marjorie Hines Woollacott, et Nelci Adriana Cicuto Ferreira Rocha. 2013. « Assessment of Postural Control in Children with Cerebral Palsy: A Review ». *Research in Developmental Disabilities* 34 (5): 1367-75. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2013.01.034>.
- Pavão, Sílvia Leticia, Fernanda Pereira dos Santos Silva, Geert J. P. Savelsbergh, et Nelci Adriana Cicuto Ferreira Rocha. 2015. « Use of Sensory Information during Postural Control in Children with Cerebral Palsy: Systematic Review ». *Journal of Motor Behavior* 47 (4): 291-301. <https://doi.org/10.1080/00222895.2014.981498>.
- Peeters, N., B. Hanssen, F. Cenni, S. H. Schless, N. De Beukelaer, M. Degelaen, C. Van den Broeck, A. Van Campenhout, K. Desloovere, et L. Bar-On. 2018. « Do Botulinum Toxin-A and Lower Leg

- Casting Alter Calf Muscle and Tendon Lengths in Children with Spastic Cerebral Palsy? » *Gait & Posture*, ESMAC 2018 abstracts, 65 (septembre): 36-38. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.06.037>.
- Peeters, Nicky, Eirini Papageorgiou, Britta Hanssen, Nathalie De Beukelaer, Lauraine Staut, Marc Degelaen, Christine Van den Broeck, et al. 2022. « The Short-Term Impact of Botulinum Neurotoxin-A on Muscle Morphology and Gait in Children with Spastic Cerebral Palsy ». *Toxins* 14 (10): 676. <https://doi.org/10.3390/toxins14100676>.
- Peeters, Nicky, Anja Van Campenhout, Britta Hanssen, Francesco Cenni, Simon-Henri Schless, Christine Van den Broeck, Kaat Desloovere, et Lynn Bar-On. 2020. « Joint and Muscle Assessments of the Separate Effects of Botulinum NeuroToxin-A and Lower-Leg Casting in Children With Cerebral Palsy ». *Frontiers in Neurology* 11. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fneur.2020.00210>.
- Pennington, Lindsay, Mona Dave, Jennifer Rudd, Mary Jo Cooley Hidecker, Katy Caynes, et Mark S. Pearce. 2020. « Communication Disorders in Young Children with Cerebral Palsy ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 62 (10): 1161-69. <https://doi.org/10.1111/dmcn.14635>.
- Pérennou, D. 2012. « Physiologie et physiopathologie du contrôle postural ». *La Lettre de médecine physique et de réadaptation* 28 (3): 120-32. <https://doi.org/10.1007/s11659-012-0316-1>.
- Perucca, Laura, Antonio Robecchi Majnardi, Silvia Frau, et Stefano Scarano. 2021. « Normative Data for the NeuroCom® Sensory Organization Test in Subjects Aged 80–89 Years ». *Frontiers in Human Neuroscience* 15. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnhum.2021.761262>.
- Peterka, R. J., et F. O. Black. 1990. « Age-Related Changes in Human Posture Control: Sensory Organization Tests ». *Journal of Vestibular Research: Equilibrium & Orientation* 1 (1): 73-85.
- Peterka, Robert J. 2018a. « Sensory Integration for Human Balance Control ». *Handbook of Clinical Neurology* 159: 27-42. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63916-5.00002-1>.
- Peterka, Robert J. 2018b. « Chapter 2 - Sensory Integration for Human Balance Control ». In *Handbook of Clinical Neurology*, édité par Brian L. Day et Stephen R. Lord, 159:27-42. Balance, Gait, and Falls. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63916-5.00002-1>.
- Peterson, Melissa L., Evangelos Christou, et Karl S. Rosengren. 2006. « Children Achieve Adult-like Sensory Integration during Stance at 12-Years-Old ». *Gait & Posture* 23 (4): 455-63. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2005.05.003>.
- Phadke, Chetan Purushottam, Farooq Ismail, Chris Boulias, William Gage, et George Mochizuki. 2014. « The Impact of Post-Stroke Spasticity and Botulinum Toxin on Standing Balance: A Systematic Review ». *Expert Review of Neurotherapeutics* 14 (3): 319-27. <https://doi.org/10.1586/14737175.2014.887443>.
- Pham, Hong Phi, Anita Eidem, Gry Hansen, Astrid Nyquist, Torstein Vik, et Rannei Sæther. 2016. « Validity and Responsiveness of the Trunk Impairment Scale and Trunk Control Measurement Scale in Young Individuals with Cerebral Palsy ». *Physical & Occupational Therapy in Pediatrics*, février, 1-13. <https://doi.org/10.3109/01942638.2015.1127867>.
- Pienciak-Siewert, Alison, Dylan P. Horan, et Alaa A. Ahmed. 2020. « Role of Muscle Coactivation in Adaptation of Standing Posture during Arm Reaching ». *Journal of Neurophysiology* 123 (2): 529-47. <https://doi.org/10.1152/jn.00939.2017>.
- Pierce, Samuel R., Tracy Kornafel, Julie Skorup, Athylia C. Paremski, et Laura A. Prosser. 2020. « Construct Validity of the Early Clinical Assessment of Balance in Toddlers with Cerebral Palsy: Brief Report ». *Developmental Neurorehabilitation* 23 (2): 137-39. <https://doi.org/10.1080/17518423.2019.1683910>.
- Pierce, Samuel R., Julie Skorup, Allyson Miller, Athylia C. Paremski, et Laura A. Prosser. 2019. « The Responsiveness and Validity of the Early Clinical Assessment of Balance in Toddlers with Cerebral Palsy: Brief Report ». *Developmental Neurorehabilitation* 22 (7): 496-98. <https://doi.org/10.1080/17518423.2018.1523244>.
- Pin, Tamis W., Penelope B. Butler, Hon-Ming Cheung, et Sandra Lai-Fong Shum. 2020. « Longitudinal Development of Segmental Trunk Control in Full Term and Preterm Infants- a Pilot Study: Part

- Piscitelli, Daniele, Francesco Ferrarello, Alessandro Ugolini, Sofia Verola, et Leonardo Pellicciari. 2021. « Measurement Properties of the Gross Motor Function Classification System, Gross Motor Function Classification System-Expanded & Revised, Manual Ability Classification System, and Communication Function Classification System in Cerebral Palsy: A Systematic Review with Meta-Analysis ». *Developmental Medicine & Child Neurology* 63 (11): 1251-61. <https://doi.org/10.1111/dmcn.14910>.
- Pitcher, Christian A., Catherine M. Elliott, Fausto A. Panizzolo, Jane P. Valentine, Katherine Stannage, et Siobhán L. Reid. 2015. « Ultrasound Characterization of Medial Gastrocnemius Tissue Composition in Children with Spastic Cerebral Palsy ». *Muscle & Nerve* 52 (3): 397-403. <https://doi.org/10.1002/mus.24549>.
- Pletcher, Erin R., Valerie J. Williams, John P. Abt, Paul M. Morgan, Jeffrey J. Parr, Meleesa F. Wohleber, Mita Lovalekar, et Timothy C. Sell. 2017. « Normative Data for the NeuroCom Sensory Organization Test in US Military Special Operations Forces ». *Journal of Athletic Training* 52 (2): 129-36. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-52.1.05>.
- Polastri, Paula F., et José A. Barela. 2013. « Adaptive Visual Re-Weighting in Children's Postural Control ». *PLoS One* 8 (12): e82215. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0082215>.
- Pollock, A. S., B. R. Durward, P. J. Rowe, et J. P. Paul. 2000. « What Is Balance? » *Clinical Rehabilitation* 14 (4): 402-6. <https://doi.org/10.1191/0269215500cr342oa>.
- Pradines, Maud, Mouna Ghedira, Raphaël Portero, Ingrid Masson, Christina Marciniak, Dawn Hicklin, Emilie Hutin, Pierre Portero, Jean-Michel Gracies, et Nicolas Bayle. 2019. « Ultrasound structural changes in triceps surae after a 1-year daily self-stretch program: a prospective randomized controlled trial in chronic hemiparesis ». *Neurorehabilitation and neural repair* 33 (4): 245-59.
- Pritchard-Wiart, Lesley, et Shanon K Phelan. 2018. « Goal Setting in Paediatric Rehabilitation for Children with Motor Disabilities: A Scoping Review ». *Clinical Rehabilitation* 32 (7): 954-66. <https://doi.org/10.1177/0269215518758484>.
- Proske, Uwe, et Simon C. Gandevia. 2012. « The Proprioceptive Senses: Their Roles in Signaling Body Shape, Body Position and Movement, and Muscle Force ». *Physiological Reviews* 92 (4): 1651-97. <https://doi.org/10.1152/physrev.00048.2011>.
- Quijoux, Flavien, Alice Nicolaï, Ikram Chairi, Ioannis Bargiotas, Damien Ricard, Alain Yelnik, Laurent Oudre, et al. 2021. « A review of center of pressure (COP) variables to quantify standing balance in elderly people: Algorithms and open-access code ». *Physiological Reports* 9 (22): e15067. <https://doi.org/10.14814/phy2.15067>.
- Rahimzadeh Khiabani, Reza, George Mochizuki, Farooq Ismail, Chris Boulias, Chetan P. Phadke, et William H. Gage. 2017. « Impact of Spasticity on Balance Control during Quiet Standing in Persons after Stroke ». *Stroke Research and Treatment* 2017 (septembre): e6153714. <https://doi.org/10.1155/2017/6153714>.
- Ravizzotti, Elisa, Stefano Vercelli, Leonardo Pellicciari, Mariusz P. Furmanek, Giulia Zagnoni, et Daniele Piscitelli. 2021. « Reliability and Validity of the Trunk Control Measurement Scale Among Children and Adolescents With Cerebral Palsy in Tanzania ». *Perceptual and Motor Skills* 128 (2): 731-45. <https://doi.org/10.1177/0031512520983701>.
- Reedman, Sarah, Roslyn N. Boyd, et Leanne Sakzewski. 2017. « The Efficacy of Interventions to Increase Physical Activity Participation of Children with Cerebral Palsy: A Systematic Review and Meta-Analysis ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 59 (10): 1011-18. <https://doi.org/10.1111/dmcn.13413>.
- Reid, Susan M., Charuta D. Daga, Michael R. Ditchfield, John B. Carlin, et Dinah S. Reddihough. 2014. « Population-Based Studies of Brain Imaging Patterns in Cerebral Palsy ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 56 (3): 222-32. <https://doi.org/10.1111/dmcn.12228>.

- Rinaldi, Natalia Madalena, Paula Fávaro Polastri, et José Angelo Barela. 2009. « Age-Related Changes in Postural Control Sensory Reweighting ». *Neuroscience Letters* 467 (3): 225-29. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2009.10.042>.
- Robbins, WJ. 1928. « Growth ».
- Rodby-Bousquet, Elisabet, Måns Persson-Bunke, et Tomasz Czuba. 2015. « Psychometric Evaluation of the Posture and Postural Ability Scale for Children with Cerebral Palsy ». *Clinical Rehabilitation*, juin. <https://doi.org/10.1177/0269215515593612>.
- Roll, Régine, Anne Kavounoudias, et Jean-Pierre Roll. 2002. « Cutaneous Afferents from Human Plantar Sole Contribute to Body Posture Awareness ». *NeuroReport* 13 (15): 1957-61. [https://journals.lww.com/neuroreport/Abstract/2002/10280/Cutaneous\\_afferents\\_from\\_human\\_plantar\\_sole.25.aspx](https://journals.lww.com/neuroreport/Abstract/2002/10280/Cutaneous_afferents_from_human_plantar_sole.25.aspx).
- Roncesvalles, M. N., M. H. Woollacott, et J. L. Jensen. 2001. « Development of Lower Extremity Kinetics for Balance Control in Infants and Young Children ». *Journal of Motor Behavior* 33 (2): 180-92. <https://doi.org/10.1080/00222890109603149>.
- Roncesvalles, M. N., M. W. Woollacott, et P. A. Burtner. 2002. « Neural Factors Underlying Reduced Postural Adaptability in Children with Cerebral Palsy ». *Neuroreport* 13 (18): 2407-10. <https://doi.org/10.1097/00001756-200212200-00006>.
- Rosello, Monica, Alfonso Caro-Llopis, Carmen Orellana, Silvestre Oltra, Marta Alemany-Albert, Ana V. Marco-Hernandez, Sandra Monfort, Laia Pedrola, Francisco Martinez, et Miguel Tomás. 2021. « Hidden Etiology of Cerebral Palsy: Genetic and Clinical Heterogeneity and Efficient Diagnosis by next-Generation Sequencing ». *Pediatric Research* 90 (2): 284-88. <https://doi.org/10.1038/s41390-020-01250-3>.
- Rosenbaum, P., et J. W. Gorter. 2012. « The 'F-words' in Childhood Disability: I Swear This Is How We Should Think! » *Child: Care, Health and Development* 38 (4): 457-63. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2214.2011.01338.x>.
- Rosenbaum, P., N. Paneth, A. Leviton, et et al. 2007. « report: the definition and classification of cerebral palsy. » *Dev. med. child. neurol.* 109: 8-14.
- Rosenbaum, Peter. 2022. « Is Cerebral Palsy Progressive? Why Do We Ask? » *Developmental Medicine and Child Neurology* 64 (6): 672. <https://doi.org/10.1111/dmcn.15168>.
- Rumberg, Franziska, Mustafa Sinan Bakir, William R. Taylor, Hannes Haberl, Akosua Sarpong, Ilya Sharankou, Susanne Lebek, et Julia F. Funk. 2016. « The Effects of Selective Dorsal Rhizotomy on Balance and Symmetry of Gait in Children with Cerebral Palsy ». *PLoS ONE* 11 (4): e0152930. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0152930>.
- Rusek, Wojciech, Joanna Baran, Justyna Leszczak, Marzena Adamczyk, Rafał Baran, Aneta Weres, Grzegorz Ingłot, Ewelina Czenczek-Lewandowska, et Teresa Pop. 2021. « Changes in Children's Body Composition and Posture during Puberty Growth ». *Children* 8 (4): 288. <https://doi.org/10.3390/children8040288>.
- Russell, Dianne J., Peter Rosenbaum, Marilyn Wright, et Lisa M. Avery. 2002. *Gross Motor Function Measure (GMFM-66 & GMFM-88) Users Manual*. Mac Keith Press. <https://acuresearchbank.acu.edu.au/item/88v85/gross-motor-function-measure-gmfm-66-gmfm-88-users-manual>.
- Sá, Cristina Dos Santos Cardoso de, Catarina Costa Boffino, Renato Teodoro Ramos, et Clarice Tanaka. 2018. « Development of Postural Control and Maturation of Sensory Systems in Children of Different Ages a Cross-Sectional Study ». *Brazilian Journal of Physical Therapy* 22 (1): 70-76. <https://doi.org/10.1016/j.bjpt.2017.10.006>.
- Saavedra, Sandra L., et Adam D. Goodworth. 2020. « Postural Control in Children and Youth with Cerebral Palsy ». In *Cerebral Palsy*, édité par Freeman Miller, Steven Bachrach, Nancy Lennon, et Margaret E. O'Neil, 2565-86. Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-74558-9\\_161](https://doi.org/10.1007/978-3-319-74558-9_161).
- Saether, Rannei, Jorunn L. Helbostad, Lars Adde, Lone Jørgensen, et Torstein Vik. 2013. « Reliability and Validity of the Trunk Impairment Scale in Children and Adolescents with Cerebral Palsy ».

- Saether, Rannei, Jorunn L. Helbostad, Ingrid I. Riphagen, et Torstein Vik. 2013. « Clinical tools to assess balance in children and adults with cerebral palsy: a systematic review ». *Developmental Medicine & Child Neurology* 55 (11): 988-99.
- Salis, Jenifer, et Asir Samuel. 2014. « Four Square Step Test in Children with Typical Development: Test-Retest and Inter Rater Reliability-A Pilot Study », janvier.  
<https://doi.org/10.13140/2.1.1929.8080>.
- Sánchez, María B., Ian Loram, Paul Holmes, John Darby, et Penelope B. Butler. 2018. « Working towards an Objective Segmental Assessment of Trunk Control in Children with Cerebral Palsy ». *Gait & Posture* 65 (septembre): 45-50. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.06.176>.
- Sangkarit, Noppharath, Orawan Keeratisroj, Ponlapat Yonglithipagon, Surussawadi Bennett, et Wantana Siritaratiwat. 2021. « Segmental Assessment of Trunk Control in Moderate-to-Late Preterm Infants Related to Sitting Development ». *Children (Basel, Switzerland)* 8 (9): 722. <https://doi.org/10.3390/children8090722>.
- Sättilä, Heli. 2020. « Over 25 Years of Pediatric Botulinum Toxin Treatments: What Have We Learned from Injection Techniques, Doses, Dilutions, and Recovery of Repeated Injections? » *Toxins* 12 (7): E440. <https://doi.org/10.3390/toxins12070440>.
- Schiariti, Verónica, Egmar Longo, Alexander Shoshmin, Ludmila Kozhushko, Yanina Besstrashnova, Maria Król, Taynah Neri Correia Campos, et al. 2018. « Implementation of the International Classification of Functioning, Disability, and Health (ICF) Core Sets for Children and Youth with Cerebral Palsy: Global Initiatives Promoting Optimal Functioning ». *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15 (9). <https://doi.org/10.3390/ijerph15091899>.
- Schiariti, Verónica, Soheil Mahdi, et Sven Bölte. 2018. « International Classification of Functioning, Disability and Health Core Sets for Cerebral Palsy, Autism Spectrum Disorder, and Attention-Deficit-Hyperactivity Disorder ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 60 (9): 933-41. <https://doi.org/10.1111/dmcn.13922>.
- Schmidt, Ann Katrin, Marloes van Gorp, Leontien van Wely, Marjolijn Ketelaar, Sander R. Hilberink, Marij E. Roebroek, et Perrin-Decade Pip Study Groups. 2020. « Autonomy in Participation in Cerebral Palsy from Childhood to Adulthood ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 62 (3): 363-71. <https://doi.org/10.1111/dmcn.14366>.
- Schmit, Jennifer. 2015. « Children with Cerebral Palsy Effectively Modulate Postural Control to Perform a Supra-Postural Task ». *Gait & Posture*, Gait and Posture, 42 (1): 49-53.
- Schmitt, Daniel. 2003. « Insights into the evolution of human bipedalism from experimental studies of humans and other primates ». *Journal of Experimental Biology* 206 (9): 1437-48. <https://doi.org/10.1242/jeb.00279>.
- Schmitz, Christina, Nicolas Martin, et Christine Assaiante. 2002. « Building Anticipatory Postural Adjustment during Childhood: A Kinematic and Electromyographic Analysis of Unloading in Children from 4 to 8 Years of Age ». *Experimental Brain Research* 142 (3): 354-64. <https://doi.org/10.1007/s00221-001-0910-y>.
- Scholtes, Vanessa A. B., Jules G. Becher, Anita Beelen, et Gustaaf J. Lankhorst. 2006. « Clinical Assessment of Spasticity in Children with Cerebral Palsy: A Critical Review of Available Instruments ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 48 (1): 64-73. <https://doi.org/10.1017/S0012162206000132>.
- Schwesig, René, Stephan Becker, et David Fischer. 2014. « Intraobserver reliability of posturography in healthy subjects ». *Somatosensory & Motor Research* 31 (1): 16-22. <https://doi.org/10.3109/08990220.2013.819797>.
- Scobbie, Lesley, Katie Thomson, Alex Pollock, et Jonathan Evans. 2021. « Goal Adjustment by People Living with Long-Term Conditions: A Scoping Review of Literature Published from January 2007 to June 2018. » *Neuropsychological Rehabilitation* 31 (8): 1314-45. <https://doi.org/10.1080/09602011.2020.1774397>.

- Scorcelletti, Matteo, Neil D. Reeves, Jörn Rittweger, et Alex Ireland. 2020. « Femoral Anteversion: Significance and Measurement ». *Journal of Anatomy* 237 (5): 811-26. <https://doi.org/10.1111/joa.13249>.
- Seesahai, Judy, Maureen Luther, Paige Terrien Church, Patricia Maddalena, Elizabeth Asztalos, Thomas Rotter, et Rudaina Banihani. 2021. « The Assessment of General Movements in Term and Late-Preterm Infants Diagnosed with Neonatal Encephalopathy, as a Predictive Tool of Cerebral Palsy by 2 Years of Age-a Scoping Review ». *Systematic Reviews* 10 (1): 226. <https://doi.org/10.1186/s13643-021-01765-8>.
- Sellier, Elodie, Sarah McIntyre, Hayley Smithers-Sheedy, Mary Jane Platt, et on behalf of SCPE and ACPR Groups. 2020. « European and Australian Cerebral Palsy Surveillance Networks Working Together for Collaborative Research ». *Neuropediatrics* 51 (2): 105-12. <https://doi.org/10.1055/s-0039-3402003>.
- Sellier, Elodie, Mary Jane Platt, Guro L Andersen, Ingeborg Krägeloh-Mann, Javier De La Cruz, Christine Cans, et Surveillance of Cerebral Palsy Network. 2016. « Decreasing Prevalence in Cerebral Palsy: A Multi-Site European Population-Based Study, 1980 to 2003 ». *Developmental Medicine & Child Neurology* 58 (1): 85-92. <https://doi.org/10.1111/dmnc.12865>.
- Shaikh, Atiya A., et Radhika N. Walunjkar. 2014. « Reliability of the Star Excursion Balance Test (SEBT) in Healthy Children of 12-16 Years ». *Indian Journal of Physiotherapy & Occupational Therapy-An International Journal* 8 (2): 29-32. <https://www.ij-scholar.in/index.php/ijpot/article/view/51074>.
- Shams, Amir, Roshanak Vameghi, Parvaneh Shamsipour Dehkordi, Nahid Allafan, et Mahdi Bayati. 2020. « The Development of Postural Control among Children: Repeatability and Normative Data for Computerized Dynamic Posturography System ». *Gait & Posture* 78 (mai): 40-47. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2020.03.002>.
- Shamsi, MohammadBagher, Maryam Mirzaei, et Seyyed Saeed Khabiri. 2019. « Universal goniometer and electro-goniometer intra-examiner reliability in measuring the knee range of motion during active knee extension test in patients with chronic low back pain with short hamstring muscle ». *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation* 11 (1): 4. <https://doi.org/10.1186/s13102-019-0116-x>.
- Shamsoddini, Alireza, Susan Amirsalari, Mohammad-Taghi Hollisaz, Alireza Rahimnia, et Amideddin Khatibi-Aghda. 2014. « Management of Spasticity in Children with Cerebral Palsy ». *Iranian Journal of Pediatrics* 24 (4): 345-51. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4339555/>.
- Sheehan, G. 2002. « The pathophysiology of spasticity ». *European journal of neurology* 9: 3-9.
- Sheehan, Dwayne P., Mark R. Lafave, et Larry Katz. 2011. « Intra-Rater and Inter-Rater Reliability of the Balance Error Scoring System in Pre-Adolescent School Children ». *Measurement in Physical Education and Exercise Science* 15 (3): 234-43. <https://doi.org/10.1080/1091367X.2011.568368>.
- Shelfelbine, S. J., C. Tardieu, et D. R. Carter. 2002. « Development of the Femoral Bicondylar Angle in Hominid Bipedalism ». *Bone* 30 (5): 765-70. [https://doi.org/10.1016/S8756-3282\(02\)00700-7](https://doi.org/10.1016/S8756-3282(02)00700-7).
- Shelly, A, E Davis, E Waters, A Mackinnon, D Reddihough, R Boyd, S Reid, et H K Graham. 2008. « The Relationship between Quality of Life and Functioning for Children with Cerebral Palsy ». *Developmental Medicine & Child Neurology* 50 (3): 199-203. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2008.02031.x>.
- Sherrington, Charles. 1907. « The Integrative Action of the Nervous System. » *The Journal of Nervous and Mental Disease* 34 (12): 801-2. [https://journals.lww.com/jonmd/Citation/1907/34120/The\\_Integrative\\_Action\\_of\\_the\\_Nervous\\_System.21.aspx](https://journals.lww.com/jonmd/Citation/1907/34120/The_Integrative_Action_of_the_Nervous_System.21.aspx).
- Shim, Dain, Dongho Park, Beomki Yoo, Joong-on Choi, Juntaek Hong, Tae Young Choi, Eun Sook Park, et Dong-wook Rha. 2022. « Evaluation of Sitting and Standing Postural Balance in Cerebral Palsy by Center-of-Pressure Measurement Using Force Plates: Comparison with Clinical

- Measurements ». *Gait & Posture* 92 (février): 110-15. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.11.024>.
- Shore, Benjamin J., Benjamin G. Allar, Patricia E. Miller, Travis H. Matheney, Brian D. Snyder, et Maria Fragala-Pinkham. 2019. « Measuring the Reliability and Construct Validity of the Pediatric Evaluation of Disability Inventory–Computer Adaptive Test (PEDI-CAT) in Children With Cerebral Palsy ». *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 100 (1): 45-51. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2018.07.427>.
- Shumway-Cook, A., et F. B. Horak. 1986. « Assessing the Influence of Sensory Interaction of Balance. Suggestion from the Field ». *Physical Therapy* 66 (10): 1548-50. <https://doi.org/10.1093/ptj/66.10.1548>.
- Shumway-Cook, A., et M. H. Woollacott. 1985. « The Growth of Stability: Postural Control from a Development Perspective ». *Journal of Motor Behavior* 17 (2): 131-47. <https://doi.org/10.1080/00222895.1985.10735341>.
- Shumway-Cook, Anne, Susan Hutchinson, Deborah Kartin, Robert Price Msme, et Marjorie Woollacott. 2007. « Effect of Balance Training on Recovery of Stability in Children with Cerebral Palsy ». *Developmental Medicine & Child Neurology* 45 (9): 591-602. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2003.tb00963.x>.
- Shumway-Cook, Anne, Susan Hutchinson, Deborah Kartin, Robert Price, et Marjorie Woollacott. 2003. « Effect of balance training on recovery of stability in children with cerebral palsy ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 45 (9): 591-602.
- Shumway-Cook, Anne, et Marjorie H. Woollacott. 1995. *Motor Control: Theory and Practical Applications*. Baltimore: Williams & Wilkins.
- Sibley, Kathryn M., Marla K. Beauchamp, Karen Van Ooteghem, Marie Paterson, et Kristy D. Wittmeier. 2017. « Components of Standing Postural Control Evaluated in Pediatric Balance Measures: A Scoping Review ». *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 98 (10): 2066-2078.e4. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2017.02.032>.
- Siebert, Richard J., et William M. M. Leveck. 2014. *Rehabilitation Goal Setting: Theory, Practice and Evidence*. CRC Press.
- Sikdar, Siddhartha, Guoqing Diao, Diego Turo, Christopher J. Stanley, Abhinav Sharma, Amy Chambliss, Loretta Laughrey, April Aralar, et Diane L. Damiano. 2018. « Quantification of Muscle Tissue Properties by Modeling the Statistics of Ultrasound Image Intensities Using a Mixture of Gamma Distributions in Children With and Without Cerebral Palsy ». *Journal of Ultrasound in Medicine: Official Journal of the American Institute of Ultrasound in Medicine*, février. <https://doi.org/10.1002/jum.14566>.
- Singer, Jonathan C., Kanako Nishihara, et George Mochizuki. 2016. « Does Poststroke Lower-Limb Spasticity Influence the Recovery of Standing Balance Control? A 2-Year Multilevel Growth Model ». *Neurorehabilitation and Neural Repair* 30 (7): 626-34. <https://doi.org/10.1177/1545968315613862>.
- Slijper, H., et M. Latash. 2000. « The Effects of Instability and Additional Hand Support on Anticipatory Postural Adjustments in Leg, Trunk, and Arm Muscles during Standing ». *Experimental Brain Research* 135 (1): 81-93. <https://doi.org/10.1007/s002210000492>.
- Smithers-Sheedy, Hayley, Nadia Badawi, Eve Blair, Christine Cans, Kate Himmelmann, Ingeborg Krägeloh-Mann, Sarah McIntyre, et al. 2014. « What Constitutes Cerebral Palsy in the Twenty-First Century? ». *Developmental Medicine & Child Neurology* 56 (4): 323-28. <https://doi.org/10.1111/dmcn.12262>.
- Song, Yanlong, Emmanuelle Renoul, Stephanie Acord, Yvette R. Johnson, Warren Marks, George Alexandrakis, et Christos Papadelis. 2021. « Aberrant Somatosensory Phase Synchronization in Children with Hemiplegic Cerebral Palsy ». *Neuroscience Letters* 762 (septembre): 136169. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2021.136169>.
- Sparto, Patrick J., Mark S. Redfern, Jeff G. Jasko, Margaretha L. Casselbrant, Ellen M. Mandel, et Joseph M. Furman. 2006. « The Influence of Dynamic Visual Cues for Postural Control in Children Aged



- 7–12 Years ». *Experimental Brain Research* 168 (4): 505-16. <https://doi.org/10.1007/s00221-005-0109-8>.
- Stanek, Jeremy L., Jane A. Emerson, Fred A. Murdock, et Gregory F. Petroski. 2016. « Growth Characteristics in Cerebral Palsy Subtypes: A Comparative Assessment ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 58 (9): 931-35. <https://doi.org/10.1111/dmcn.13116>.
- Stavsky, Moshe, Omer Mor, Salvatore Andrea Mastrolia, Shirley Greenbaum, Nandor Gabor Than, et Offer Erez. 2017. « Cerebral Palsy—Trends in Epidemiology and Recent Development in Prenatal Mechanisms of Disease, Treatment, and Prevention ». *Frontiers in Pediatrics* 5. <https://doi.org/10.3389/fped.2017.00021>.
- Steindl, R., K. Kunz, A. Schrott-Fischer, et A. W. Scholtz. 2006. « Effect of Age and Sex on Maturation of Sensory Systems and Balance Control ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 48 (6): 477-82. <https://doi.org/10.1017/S0012162206001022>.
- Stribling, Kate, et Jennifer Christy. 2017. « Creative Dance Practice Improves Postural Control in a Child With Cerebral Palsy ». *Pediatric Physical Therapy: The Official Publication of the Section on Pediatrics of the American Physical Therapy Association* 29 (4): 365-69. <https://doi.org/10.1097/PEP.0000000000000450>.
- Suk, Min-Hwa, In-Kyeong Park, Soojin Yoo, et Jeong-Yi Kwon. 2021. « The Association between Motor Capacity and Motor Performance in School-Aged Children with Cerebral Palsy: An Observational Study ». *Journal of Exercise Science & Fitness* 19 (4): 223-28. <https://doi.org/10.1016/j.jesf.2021.07.002>.
- Surveillance of Cerebral Palsy in Europe. 2000. « Surveillance of Cerebral Palsy in Europe: A Collaboration of Cerebral Palsy Surveys and Registers. Surveillance of Cerebral Palsy in Europe (SCPE) ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 42 (12): 816-24. <https://doi.org/10.1017/s0012162200001511>.
- Sutherland, D., R. Olshen, L. Cooper, et et al. 1980. « The development of mature gait. » *The Journal of bone and joint surgery*.
- Švehlík, Martin, Ernst B. Zwick, Gerhard Steinwender, Tanja Kraus, et Wolfgang E. Linhart. 2010. « Dynamic Versus Fixed Equinus Deformity in Children With Cerebral Palsy: How Does the Triceps Surae Muscle Work? » *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 91 (12): 1897-1903. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2010.09.005>.
- Szczepanowska-Wolowiec, Beata, Paulina Sztandera, Ireneusz Kotela, et Marek Zak. 2019. « Feet deformities and their close association with postural stability deficits in children aged 10–15 years ». *BMC Musculoskeletal Disorders* 20 (1): 537. <https://doi.org/10.1186/s12891-019-2923-3>.
- Szopa, Andrzej, et Małgorzata Domagalska-Szopa. 2015. « Postural Stability in Children with Hemiplegia Estimated for Three Postural Conditions: Standing, Sitting and Kneeling ». *Research in Developmental Disabilities* 39 (avril): 67-75. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2015.01.001>.
- Szopa, Andrzej, Małgorzata Domagalska-Szopa, Zenon Kidoń, et Małgorzata Syczewska. 2014. « Quadriceps Femoris Spasticity in Children with Cerebral Palsy: Measurement with the Pendulum Test and Relationship with Gait Abnormalities ». *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation* 11 (décembre): 166. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-11-166>.
- Tardieu, C. 2018. « Origine et évolution de la bipédie ». *Motricité Cérébrale* 39 (2): 55-65. <https://doi.org/10.1016/j.motcer.2018.04.003>.
- Tardieu, Catherine, Alain Lespargot, Chantal Tabary, et Marie-Dominique Bret. 1989. « Toe-Walking in Children with Cerebral Palsy: Contributions of Contracture and Excessive Contraction of Triceps Surae Muscle ». *Physical Therapy* 69 (8): 656-62. <https://doi.org/10.1093/ptj/69.8.656>.
- Taylor, S., B. McLean, T. Falkmer, L. Carey, S. Girdler, C. Elliott, et E. Blair. 2016. « Does Somatosensation Change with Age in Children and Adolescents? A Systematic Review ». *Child: Care, Health and Development* 42 (6): 809-24. <https://doi.org/10.1111/cch.12375>.
- Tedesco, Ana Paula, Juliana Saccol Martins, et Renata D'Agostini Nicolini-Panisson. 2014. « Focal Treatment of Spasticity Using Botulinum Toxin A in Cerebral Palsy Cases of GMFCS Level V:

- Evaluation of Adverse Effects ». *Revista Brasileira De Ortopedia* 49 (4): 359-63. <https://doi.org/10.1016/j.rboe.2014.04.022>.
- Tedla, J. S., et R. S. Reddy. 2021. « Evaluation of Psychometric Properties of the Segmental Assessment of Trunk Control (SATCo) in Children with Spastic Quadriplegic Cerebral Palsy ». *Nigerian Journal of Clinical Practice* 24 (7): 1077-81. [https://doi.org/10.4103/njcp.njcp\\_265\\_20](https://doi.org/10.4103/njcp.njcp_265_20).
- Teulier, Caroline, Do Kyeong Lee, et Beverly D. Ulrich. 2015. « Early Gait Development in Human Infants: Plasticity and Clinical Applications ». *Developmental Psychobiology* 57 (4): 447-58. <https://doi.org/10.1002/dev.21291>.
- Thoumie, P., et MC. Do. 1996. « Changes in motor activity and biomechanics during balance recovery following cutaneous and muscular deafferentation. » *Exp. Brain Res.* 110: 289-97.
- Thyssen, H. H., J. Brynskov, E. C. Jansen, et J. Münster-Swendsen. 1982. « Normal Ranges and Reproducibility for the Quantitative Romberg's Test ». *Acta Neurologica Scandinavica* 66 (1): 100-104. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0404.1982.tb03133.x>.
- Tilton, Ann, Barry Russman, Resa Aydin, Umit Dincer, Raul G. Escobar, Sehim Kutlay, Zbigniew Lipczyk, et al. 2017. « AbobotulinumtoxinA (Dysport®) Improves Function According to Goal Attainment in Children With Dynamic Equinus Due to Cerebral Palsy ». *Journal of Child Neurology* 32 (5): 482-87. <https://doi.org/10.1177/0883073816686910>.
- Ting, Lena H., Hillel J. Chiel, Randy D. Trumbower, Jessica L. Allen, J. Lucas McKay, Madeleine E. Hackney, et Trisha M. Kesar. 2015. « Neuromechanical Principles Underlying Movement Modularity and Their Implications for Rehabilitation ». *Neuron* 86 (1): 38-54. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.02.042>.
- Tomita, Hidehito, Yoshiki Fukaya, Daisuke Kawaguchi, Tadashi Ito, et Yumi Aoki. 2022. « An Increase in Relative Contribution of Compensatory Postural Adjustments during Voluntary Movement While Standing in Adolescents and Young Adults with Bilateral Spastic Cerebral Palsy ». *Experimental Brain Research* 240 (12): 3315-25. <https://doi.org/10.1007/s00221-022-06499-0>.
- Touyama, Mayumi, Jun Touyama, Satoshi Toyokawa, et Yasuki Kobayashi. 2016. « Trends in the Prevalence of Cerebral Palsy in Children Born between 1988 and 2007 in Okinawa, Japan ». *Brain & Development* 38 (9): 792-99. <https://doi.org/10.1016/j.braindev.2016.03.007>.
- Towns, Megan, Sally Lindsay, Kelly Arbour-Nicitopoulos, Avril Mansfield, et F. Virginia Wright. 2022. « Balance Confidence and Physical Activity Participation of Independently Ambulatory Youth with Cerebral Palsy: An Exploration of Youths' and Parents' Perspectives ». *Disability and Rehabilitation* 44 (11): 2305-16. <https://doi.org/10.1080/09638288.2020.1830191>.
- Tsao, Henry, Kerstin Pannek, Simona Fiori, Roslyn N. Boyd, et Stephen Rose. 2014. « Reduced Integrity of Sensorimotor Projections Traversing the Posterior Limb of the Internal Capsule in Children with Congenital Hemiparesis ». *Research in Developmental Disabilities* 35 (2): 250-60. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2013.11.001>.
- Tschirren, Lea, Susanne Bauer, Chiara Hanser, Petra Marsico, Diane Sellers, et Hubertus JA van Hedel. 2018. « The Eating and Drinking Ability Classification System: concurrent validity and reliability in children with cerebral palsy ». *Developmental Medicine & Child Neurology* 60 (6): 611-17.
- Tuncer, Deniz, Hulya Nilgun Gurses, Hakan Senaran, Gokcer Uzer, et Ibrahim Tuncay. 2022. « Evaluation of Postural Control in Children with Increased Femoral Anteversion ». *Gait & Posture* 95 (juin): 109-14. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2022.04.011>.
- Tustin, Kylee, et Anita Patel. 2015. « A Critical Evaluation of the Updated Evidence for Casting for Equinus Deformity in Children with Cerebral Palsy ». *Physiotherapy Research International: The Journal for Researchers and Clinicians in Physical Therapy*, septembre. <https://doi.org/10.1002/pri.1646>.
- Uden, Hayley, Rolf Scharfbillig, et Ryan Causby. 2017. « The Typically Developing Paediatric Foot: How Flat Should It Be? A Systematic Review ». *Journal of Foot and Ankle Research* 10: 37. <https://doi.org/10.1186/s13047-017-0218-1>.
- Ullenhag, Anna, Lena Almqvist, Mats Granlund, et Lena Krumlinde-Sundholm. 2012. « Cultural validity of the Children's Assessment of Participation and Enjoyment/Preferences for Activities of

- Children (CAPE/PAC) ». *Scandinavian Journal of Occupational Therapy* 19 (5): 428-38. <https://doi.org/10.3109/11038128.2011.631218>.
- Van Naarden Braun, Kim, Nancy Doernberg, Laura Schieve, Deborah Christensen, Alyson Goodman, et Marshalyn Yeargin-Allsopp. 2016. « Birth Prevalence of Cerebral Palsy: A Population-Based Study ». *Pediatrics* 137 (1). <https://doi.org/10.1542/peds.2015-2872>.
- Verbecque, Evi, Paula Hentschel Lobo da Costa, Pieter Meyns, Kaat Desloovere, Luc Vereeck, et Ann Halleman. 2016. « Age-Related Changes in Postural Sway in Preschoolers ». *Gait & Posture* 44 (février): 116-22. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2015.11.016>.
- Verbecque, Evi, Charlotte Johnson, Eugène Rameckers, Angelina Thijs, Ingrid van der Veer, Pieter Meyns, Bouwien Smits-Engelsman, et Katrijn Klingels. 2021. « Balance Control in Individuals with Developmental Coordination Disorder: A Systematic Review and Meta-Analysis ». *Gait & Posture* 83 (janvier): 268-79. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2020.10.009>.
- Verbecque, Evi, Paula Hentschel Lobo Da Costa, Luc Vereeck, et Ann Halleman. 2015. « Psychometric Properties of Functional Balance Tests in Children: A Literature Review ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 57 (6): 521-29. <https://doi.org/10.1111/dmcn.12657>.
- Verbecque, Evi, Kirsten Schepens, Joke Theré, Bénédicte Schepens, Katrijn Klingels, et Ann Halleman. 2019. « The Timed Up and Go Test in Children: Does Protocol Choice Matter? A Systematic Review ». *Pediatric Physical Therapy: The Official Publication of the Section on Pediatrics of the American Physical Therapy Association* 31 (1): 22-31. <https://doi.org/10.1097/PEP.0000000000000558>.
- Verschuren, Olaf, Mark D. Peterson, Astrid C. J. Balemans, et Edward A. Hurvitz. 2016. « Exercise and Physical Activity Recommendations for People with Cerebral Palsy ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 58 (8): 798-808. <https://doi.org/10.1111/dmcn.13053>.
- Viel, Sébastien, Marianne Vaugoyeau, et Christine Assaiante. 2009. « Adolescence: A Transient Period of Proprioceptive Neglect in Sensory Integration of Postural Control ». *Motor Control* 13 (1): 25-42. <https://doi.org/10.1123/mcj.13.1.25>.
- Vinkel, Michael N., Gija Rackauskaite, et Nanna B. Finnerup. 2022. « Classification of Pain in Children with Cerebral Palsy ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 64 (4): 447-52. <https://doi.org/10.1111/dmcn.15102>.
- Visser, Jasper E., Mark G. Carpenter, Herman van der Kooij, et Bastiaan R. Bloem. 2008. « The clinical utility of posturography ». *Clinical neurophysiology* 119 (11): 2424-36.
- Vitrikas, Kirsten, Heather Dalton, et Dakota Breish. 2020. « Cerebral Palsy: An Overview ». *American Family Physician* 101 (4): 213-20.
- Volkman, Kathleen Gerri, Nicholas Stergiou, Wayne Stuber, Daniel Blanke, et Julie Stoner. 2007. « Methods to Improve the Reliability of the Functional Reach Test in Children and Adolescents With Typical Development ». *Pediatric Physical Therapy* 19 (1): 20. <https://doi.org/10.1097/01.pcp.0000247173.14969.5a>.
- Vos-Vromans, D. C. W. M., M. Ketelaar, et J. W. Gorter. 2005. « Responsiveness of evaluative measures for children with cerebral palsy: The Gross Motor Function Measure and the Pediatric Evaluation of Disability Inventory ». *Disability and Rehabilitation* 27 (20): 1245-52. <https://doi.org/10.1080/09638280500076178>.
- Wade, Derick T. 2009. « Goal Setting in Rehabilitation: An Overview of What, Why and How ». *Clinical Rehabilitation* 23 (4): 291-95. <https://doi.org/10.1177/0269215509103551>.
- Walhain, Fenna, Kaat Desloovere, Marlies Declerck, Anja Van Campenhout, et Lynn Bar-On. 2021. « Interventions and Lower-Limb Macroscopic Muscle Morphology in Children with Spastic Cerebral Palsy: A Scoping Review ». *Developmental Medicine & Child Neurology* 63 (3): 274-86. <https://doi.org/10.1111/dmcn.14652>.
- Walicka-Cupryś, Katarzyna, Maciej Rachwał, Agnieszka Guzik, et Paweł Piwoński. 2022. « Body Balance of Children and Youths with Visual Impairment (Pilot Study) ». *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19 (17): 11095. <https://doi.org/10.3390/ijerph191711095>.

- Wallard, Laura, Gilles Dietrich, Yves Kerlirzin, et Jonathan Bredin. 2016. « Apprentissage moteur et contrôle postural chez l'enfant ». In , 183-89.
- Wang, Fang-Fang, Tao Yu, Xiao-Lu Chen, Rong Luo, et De-Zhi Mu. 2021. « Cerebral Palsy in Children Born after Assisted Reproductive Technology: A Meta-Analysis ». *World Journal of Pediatrics: WJP* 17 (4): 364-74. <https://doi.org/10.1007/s12519-021-00442-z>.
- Waseda, Akeo, Yasunori Suda, Suguru Inokuchi, Yuji Nishiwaki, et Yoshiaki Toyama. 2014. « Standard Growth of the Foot Arch in Childhood and Adolescence--Derived from the Measurement Results of 10,155 Children ». *Foot and Ankle Surgery: Official Journal of the European Society of Foot and Ankle Surgeons* 20 (3): 208-14. <https://doi.org/10.1016/j.fas.2014.04.007>.
- Weaver, Tyler B., Michal N. Glinka, et Andrew C. Laing. 2017. « Stooping, Crouching, and Standing - Characterizing Balance Control Strategies across Postures ». *Journal of Biomechanics* 53 (février): 90-96. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2017.01.003>.
- Wei, Shi, Wang Su-Juan, Liao Yuan-Gui, Yang Hong, Xu Xiu-Juan, et Shao Xiao-Mei. 2006. « Reliability and Validity of the GMFM-66 in 0- to 3-Year-Old Children with Cerebral Palsy ». *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation* 85 (2): 141. <https://doi.org/10.1097/01.phm.0000197585.68302.25>.
- Weltgesundheitsorganisation, éd. 2001. *Classification internationale du fonctionnement, du handicap et de la santé: CIF*. Genève.
- Westcott, Sarah L., et Patricia A. Burtner. 2004. « Postural Control in Children: Implications for Pediatric Practice ». *Physical & Occupational Therapy in Pediatrics* 24 (1-2): 5-55. [https://doi.org/10.1300/j006v24n01\\_02](https://doi.org/10.1300/j006v24n01_02).
- White, Barbara Prudhomme, Shelley Mulligan, Kristen Merrill, et Janet Wright. 2007. « An Examination of the Relationships between Motor and Process Skills and Scores on the Sensory Profile ». *The American Journal of Occupational Therapy: Official Publication of the American Occupational Therapy Association* 61 (2): 154-60. <https://doi.org/10.5014/ajot.61.2.154>.
- Willerslev-Olsen, Maria, Mai Choe Lund, Jakob Lorentzen, Lee Barber, Mathilde Kofoed-Hansen, et Jens Bo Nielsen. 2018. « Impaired Muscle Growth Precedes Development of Increased Stiffness of the Triceps Surae Musculotendinous Unit in Children with Cerebral Palsy ». *Developmental Medicine & Child Neurology* 60 (7): 672-79. <https://doi.org/10.1111/dmcn.13729>.
- Williams, Elizabeth N., Sara G. Carroll, Dinah S. Reddihough, Bev A. Phillips, et Mary P. Galea. 2005. « Investigation of the Timed 'Up & Go' Test in Children ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 47 (8): 518-24. <https://doi.org/10.1017/S0012162205001027>.
- Wilson, Nichola C., Anna H. Mackey, et N. Susan Stott. 2014. « How Does the Functional Mobility Scale Relate to Capacity-Based Measures of Walking Ability in Children and Youth with Cerebral Palsy? ». *Physical & Occupational Therapy in Pediatrics* 34 (2): 185-96. <https://doi.org/10.3109/01942638.2013.791917>.
- Wingert, Jason R., Robert J. Sinclair, Sachin Dixit, Diane L. Damiano, et Harold Burton. 2010. « Somatosensory-Evoked Cortical Activity in Spastic Diplegic Cerebral Palsy ». *Human Brain Mapping* 31 (11): 1772-85. <https://doi.org/10.1002/hbm.20977>.
- Winter, DA. 1995. « Human Balance and Posture Control during Standing and Walking ». *Gait & Posture* 3 (4): 193-214. [https://doi.org/10.1016/0966-6362\(96\)82849-9](https://doi.org/10.1016/0966-6362(96)82849-9).
- Wist, Sophie, Lena Carcreff, Sjoerd M. Bruijn, Gilles Allali, Christopher J. Newman, Joel Fluss, et Stéphane Armand. 2022. « Gait Stability in Ambulant Children with Cerebral Palsy during Dual Tasks ». Édité par Yury Ivanenko. *PLOS ONE* 17 (6): e0270145. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0270145>.
- Wong, Virginia, Brian Chung, Stella Hui, Angie Fong, Candice Lau, Betty Law, Kyle Lo, Tracy Shum, et Raymond Wong. 2004. « Cerebral Palsy: Correlation of Risk Factors and Functional Performance Using the Functional Independence Measure for Children (WeeFIM) ». *Journal of Child Neurology* 19 (11): 887-93. <https://doi.org/10.1177/08830738040190110701>.
- Wood, Claire L., Laura C. Lane, et Tim Cheetham. 2019. « Puberty: Normal Physiology (Brief Overview) ». *Best Practice & Research. Clinical Endocrinology & Metabolism* 33 (3): 101265. <https://doi.org/10.1016/j.beem.2019.03.001>.

- Woollacott, Marjorie Hines, et Anne Shumway-Cook. 2005. « Postural Dysfunction during Standing and Walking in Children with Cerebral Palsy: What Are the Underlying Problems and What New Therapies Might Improve Balance? » *Neural Plasticity* 12 (2-3): 211-19; discussion 263-272. <https://doi.org/10.1155/NP.2005.211>.
- Wright, Ed, et Sally A. DiBello. 2020. « Principles of Ankle-Foot Orthosis Prescription in Ambulatory Bilateral Cerebral Palsy ». *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America* 31 (1): 69-89. <https://doi.org/10.1016/j.pmr.2019.09.007>.
- Wright, F. Virginia, Jennifer Ryan, et Kelly Brewer. 2010. « Reliability of the Community Balance and Mobility Scale (CB&M) in high-functioning school-aged children and adolescents who have an acquired brain injury ». *Brain Injury* 24 (13-14): 1585-94. <https://doi.org/10.3109/02699052.2010.523045>.
- Wright, Marilyn J., et Cecily Bos. 2012. « Performance of Children on the Community Balance and Mobility Scale ». *Physical & Occupational Therapy In Pediatrics* 32 (4): 416-29. <https://doi.org/10.3109/01942638.2012.705418>.
- Yam, Winnie Ka Ling, et Milan So Mei Leung. 2006. « Interrater Reliability of Modified Ashworth Scale and Modified Tardieu Scale in Children with Spastic Cerebral Palsy ». *Journal of Child Neurology* 21 (12): 1031-35. <https://doi.org/10.1177/7010.2006.00222>.
- Yana, Metehan, Fadodun Tutuola, Sarah Westwater-Wood, et Erdoğan Kavlak. 2019. « The Efficacy of Botulinum Toxin A Lower Limb Injections in Addition to Physiotherapy Approaches in Children with Cerebral Palsy: A Systematic Review ». *NeuroRehabilitation* 44 (2): 175-89. <https://doi.org/10.3233/NRE-182581>.
- Yang, Shengyi, Jiayue Xia, Jing Gao, et Lina Wang. 2021. « Increasing Prevalence of Cerebral Palsy among Children and Adolescents in China 1988-2020: A Systematic Review and Meta-Analysis ». *Journal of Rehabilitation Medicine* 53 (5): jrm00195. <https://doi.org/10.2340/16501977-2841>.
- Yap, Rita, Annette Majnemer, Thierry Benaroch, et Marie-Andree Cantin. 2010. « Determinants of Responsiveness to Botulinum Toxin, Casting, and Bracing in the Treatment of Spastic Equinus in Children with Cerebral Palsy ». *Developmental Medicine and Child Neurology* 52 (2): 186-93. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2009.03365.x>.
- Yen, Winston, Ariella Gartenberg, et Woojin Cho. 2021. « Pelvic Obliquity Associated with Neuromuscular Scoliosis in Cerebral Palsy: Cause and Treatment ». *Spine Deformity* 9 (5): 1259-65. <https://doi.org/10.1007/s43390-021-00346-y>.
- Yi, Sook-Hee, Ji Hye Hwang, Sang Jun Kim, et Jeong-Yi Kwon. 2012. « Validity of Pediatric Balance Scales in Children with Spastic Cerebral Palsy ». *Neuropediatrics* 43 (6): 307-13. <https://doi.org/10.1055/s-0032-1327774>.
- Yim, JongEun, Jerrold Petrofsky, et Haneul Lee. 2018. « Correlation between Mechanical Properties of the Ankle Muscles and Postural Sway during the Menstrual Cycle ». *The Tohoku Journal of Experimental Medicine* 244 (3): 201-7. <https://doi.org/10.1620/tjem.244.201>.
- Yoo. 2022. « Reliability of the Modified Ashworth and Modified Tardieu Scales with Standardized Movement Speeds in Children with Spastic Cerebral Palsy ». <https://www.mdpi.com/2227-9067/9/6/827>.
- Young, Yi-Ho. 2015. « Assessment of Functional Development of the Otolithic System in Growing Children: A Review ». *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology* 79 (4): 435-42. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2015.01.015>.
- Zammit, Gerard V., Hylton B. Menz, et Shannon E. Munteanu. 2010. « Reliability of the TekScan MatScan(R) System for the Measurement of Plantar Forces and Pressures during Barefoot Level Walking in Healthy Adults ». *Journal of Foot and Ankle Research* 3 (juin): 11. <https://doi.org/10.1186/1757-1146-3-11>.
- Zarkou, Anastasia, Samuel CK Lee, Laura A. Prosser, et John J. Jeka. 2020. « Foot and ankle somatosensory deficits affect balance and motor function in children with cerebral palsy ». *Frontiers in Human Neuroscience* 14: 45.

- Zhu Dengna, Liu Ruimin, Wang Jun, Yuan Junying, Liu Fengwei, Niu Guohui, Gao Yongqiang, et al. 2020. « Dosage effects in treating tiptoe deformity in children with spastic cerebral palsy using botulinum toxin type A ». *Chinese Journal of Physical Medicine and Rehabilitation*, 424-28. <http://dx.doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2020.05.010>.
- Zipori, Anat Bachar, Linda Colpa, Agnes M. F. Wong, Sharon L. Cushing, et Karen A. Gordon. 2018. « Postural Stability and Visual Impairment: Assessing Balance in Children with Strabismus and Amblyopia ». *PloS One* 13 (10): e0205857. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0205857>.
- Zumbrunn, Thomas, Bruce A. MacWilliams, et Barbara A. Johnson. 2011. « Evaluation of a Single Leg Stance Balance Test in Children ». *Gait & Posture* 34 (2): 174-77. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2011.04.005>.

## Bibliographie personnelle, contributions et activités scientifiques

### ✓ Publications acceptées dans des revues scientifiques internationales à comité de relecture

Demont Anthony, Gedda Michel, Lager Céline, De Lattre Capucine, Gary Yann, Keroulle Elisabeth, Feuillerat Brigitte, et al. 2022. « Evidence-Based, Implementable Motor Rehabilitation Guidelines for Individuals With Cerebral Palsy ». *Neurology*, 10.1212/WNL.0000000000200936.  
<https://doi.org/10.1212/WNL.0000000000200936>.

Cornec Gwenaël, Brochard Sylvain, Drewnowski Gaëlle, Desguerre Isabelle, Toullet Philippe, Fontaine Audrey, Le Lay Yann, et al. 2021. « The Use and Outcomes of Motor Rehabilitation Services Among People With Cerebral Palsy Change Across the Lifespan ». *Frontiers in Neurology* 12: 771348.  
<https://doi.org/10.3389/fneur.2021.771348>.

### ✓ Publications acceptées dans des revues scientifiques nationales à comité de relecture

Fontaine Audrey, Bailly Rodolphe, Pons Christelle, Demas Josselin 2023. « Les recommandations de la HAS sur la réadaptation de la fonction motrice des personnes avec paralysie cérébrale : en route vers la co-détermination d'objectifs par le trio personne avec PC/aidant/kinésithérapeute ». *Kinésithérapie, la Revue* 23 (254): 21-32. <https://doi.org/10.1016/j.kine.2022.11.008>.

Fontaine, Audrey, Thétio Michel, Bachtta Wael, Thoumie Philippe 2016. « Pertinence de l'utilisation de la posturographie dynamique dans l'évaluation des troubles de l'équilibre des sujets atteints de paralysie cérébrale ». *Neurophysiologie Clinique / Clinical Neurophysiology* 46 (4): 258-59.  
<https://doi.org/10.1016/j.neucli.2016.09.053>.

### ✓ Publications en cours de soumission dans des revues scientifiques internationales à comité de relecture

Fontaine Audrey, Gouelle Arnaud, Pionnier Raphaël, Bachtta Wael, Thoumie Philippe. « Influence of lower limb spasticity on functional balance capacity in children with spastic cerebral palsy: an observational, cross-sectional study ». *European Journal of Paediatric Neurology*.

### ✓ Communications orales dans des congrès internationaux

Fontaine Audrey, Thétio Michel. « Measure of the efficiency of walking ankle-foot orthoses with Gait-Rite® walkway in children with Cerebral Palsy », 29ème Congrès SOFMER-ESPRM 2014

### ✓ Communications orales dans des congrès nationaux

Chevalier Mathilde, Fontaine Audrey. « Comment mettre en pratique en cabinet libéral les Recommandations HAS sur la rééducation des enfants avec Paralysie Cérébrale ? », JFK 2023

Fontaine Audrey, Demas Josselin, Bailly Rodolphe, Guedin David. « Tablea-ronde. Rééducation de la Paralysie Cérébrale : comment appliquer les recommandations de la HAS », CIFEPK 2022

Fontaine Audrey. « Recommandations de Bonnes Pratiques Haute Autorité de Santé 2021 : Rééducation et réadaptation de la fonction motrice des personnes porteuses de Paralysie Cérébrale », Journées du CDI 2021

Fontaine Audrey. « Spécificités de l'examen clinique et fonctionnel des membres inférieurs de l'enfant présentant une Paralysie Cérébrale », CREIL 2021

Fontaine Audrey. « Evaluation clinique au cabinet de la marche de l'enfant présentant une Paralysie Cérébrale », CIFEPK 2020

Chevalier Mathilde, Fontaine Audrey. "La pratique du sport par des enfants atteints de Paralysie Cérébrale: effets cognitifs, moteurs, physiologiques et psycho-sociaux", JFK 2019

Fontaine Audrey, Desguerre Isabelle, Toullet Philippe, Chatelin Matthieu. Table-ronde « Enquête ESPACE, vers un plan national Paralysie Cérébrale », JFK 2019

Fontaine, Audrey, Michel Thétio, Wael Bachta, et Philippe Thoumie. « Pertinence de l'utilisation de la posturographie dynamique dans l'évaluation des troubles de l'équilibre des sujets atteints de paralysie cérébrale », SOFPEL-SOFAMEA 2016 [Prix de la meilleure communication orale]

Fontaine Audrey. « Evaluation instrumentale des troubles de la marche de l'enfant présentant une paralysie cérébrale", CIFEPK 2016

✓ Communications affichées dans des congrès internationaux

Fontaine Audrey, Toullet Philippe, Bérard Éric, Drewnoswsky Gaëlle, Gautheron Vincent, Le Lay Yann, Boivin Julia, Bodoria Maria, Brochard Sylvain, De la Cruz Javier. "Physiotherapy services delivered in France reported by children, adolescents and adults with cerebral palsy and families: ESPaCe, a national survey", EACD 2019

Le Lay Yann, Gautheron Vincent, Fontaine Audrey, Dohin Julie, Drewnowski Gaëlle, Gesguerre Isabelle, Boivin Julian, Guenier Anne-Catherine, Bodoria Maria, Brochard Sylvain, De La Cruz Javier. "Patient preferences about physical rehabilitation reported by children, adolescents and adults with cerebral palsy and their families: ESPaCe, a national survey in France", EACD 2019

✓ Communications affichées dans des congrès nationaux

Fontaine Audrey. « Evaluation multimodale de la fonction d'équilibration d'enfants de 2 à 12 ans présentant une paralysie cérébrale spastique », Journée des doctorants 2019 [Prix du meilleur poster]

Fontaine Audrey, Thétio Michel, Bachta WaelTh, Thoumie Philippe. « Protocole d'évaluation multimodale de l'équilibre dynamique d'enfants et adultes atteints de Paralysie Cérébrale », SOFPEL-SOFAMEA 2016

Fontaine Audrey, Thétio Michel. « Mesure de l'efficacité d'attelles suro-pédieuses de marche par le tapis de marche GAIT-Rite® chez l'enfant atteint de Paralysie Cérébrale », SOFAMEA 2014

✓ Chapitres de livres

Delafontaine Arnaud. « Locomotion humaine: Bases fondamentales, évaluation clinique et applications thérapeutiques de l'enfant à l'adulte ». Elsevier Health Sciences, 2018.

- Chapitre 4 « Acquisition, développement et altérations de la marche à travers les âges ». Fontaine Audrey, Artico Romain, Delafontaine Arnaud
- Chapitre 11 « Évaluation clinique de la marche : de l'enfant au sujet âgé ». Delafontaine Arnaud, Pallot Adrien, Artico Romain, Fontaine Audrey



- Chapitre 13 « Nouvelles applications thérapeutiques et locomotion ». Delafontaine Arnaud, Pallot Adrien, Fontaine Audrey, Laffaye Guillaume, Fischer Matthieu

✓ Activités scientifiques

2019-2023: Membre du Conseil Scientifique de la Fondation Paralysie Cérébrale

2020-2021: Experte auprès de la Haute Autorité de Santé au sein du groupe de travail "Rééducation motrice de l'enfant et de l'adulte atteint de Paralysie Cérébrale"

2018-2020: Experte auprès de la Haute Autorité de Santé au sein du groupe de travail " Repérages, orientations et suivi de 0 à 7 ans des enfants à haut risque de troubles du neuro-développement"

2018- 2023: Création et pilotage du Groupe d'Intérêt Pédiatrie de la Société Française de Physiothérapie

2015-2019 : Membre du Comité de Pilotage "Enquête nationale sur les besoins non-satisfaits et priorités en rééducation motrice rapportées par les personnes atteintes de paralysie cérébrale et leurs familles", Fondation Paralysie Cérébrale

✓ Vulgarisation scientifique

Emission de radio Vivre FM « La Haute Autorité de Santé recommande un changement radical de la rééducation des personnes avec paralysie cérébrale. Un bouleversement à organiser », Février 2022

Handi Connect, Participation à la rédaction des fiches pédagogiques: «Paralysie Cérébrale: les points de vigilance clinique », « Paralysie Cérébrale: définition, prévalence et étiologie », « Paralysie Cérébrale: repérage, dépistage et diagnostic », « Paralysie cérébrale: repères pour la rééducation et la réadaptation fonctionnelles », 2022

Emission de télévision, La maison des maternelles : « Paralysie Cérébrale, le jeu qui soigne », février 2020

Campagne de sensibilisation du Conseil National de l'Ordre des Kinésithérapeutes, site internet CNOMK « La rééducation des enfants Présentant une Paralysie Cérébrale », 2019

Emission de télévision, Le magazine de la santé : « Paralysie cérébrale : une rééducation précoce », janvier 2019

Emission de radio Vivre FM « Quelles sont les avancées de la recherche en matière de Paralysie Cérébrale? », novembre 2018