



HAL
open science

Amélioration d'un protocole d'analyse 3D bimanuel scénarisé du mouvement des membres supérieurs chez les enfants atteints de paralysie cérébrale spastique unilatérale

Marine Cacioppo

► **To cite this version:**

Marine Cacioppo. Amélioration d'un protocole d'analyse 3D bimanuel scénarisé du mouvement des membres supérieurs chez les enfants atteints de paralysie cérébrale spastique unilatérale. Sciences du Vivant [q-bio]. 2019. dumas-02280402

HAL Id: dumas-02280402

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02280402v1>

Submitted on 6 Sep 2019

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



AMELIORATION D'UN PROTOCOLE D'ANALYSE 3D
BIMANUEL SCENARISE DU MOUVEMENT DES MEMBRES
SUPERIEURS CHEZ LES ENFANTS ATTEINTS DE
PARALYSIE CEREBRALE SPASTIQUE UNILATERALE

Master 2 APA-S parcours APPCM

Approche Pluridisciplinaire des Pathologies Chroniques et Motrices

Présenté par : Marine CACIOPPO

Sous la direction de : Armel CRETUAL, PhD, M2S

Année universitaire : 2018 - 2019



Table des matières

Abréviations

Introduction

1. Revue de littérature

1.1. Paralyse cérébrale

1.1.1. Généralités

1.1.1.1. Définition

1.1.1.2. Épidémiologie

1.1.1.3. Étiologies et facteurs de risques

1.1.1.4. Diagnostic

1.1.1.5. Formes cliniques

1.1.2. Paralyse cérébrale spastique unilatérale (PCu) : modèle d'étude du membre supérieur

1.1.2.1. Spécificités cliniques

1.1.2.2. Traitements

1.2. Évaluation fonctionnelle des membres supérieurs chez les enfants atteints de PCu

1.2.1. Outils d'évaluation clinique

1.2.1.1. Modèle de la CIF

1.2.1.2. Classification de la fonction manuelle

1.2.1.3. Échelles d'évaluation de la performance bimanuelle

1.2.2. Analyse 3D du mouvement des membres supérieurs

1.2.2.1. Définition de l'analyse 3D des membres supérieurs

1.2.2.2. Protocoles monomanuels

1.2.2.3. Protocoles bimanuels

2. Contexte de l'étude et objectifs

3. Méthode

3.1. Population concernée

3.2. Déroulement de l'étude

3.2.1. Pour le groupe : enfants atteints de PCu

3.2.2. Pour le groupe : volontaires sains

3.3. Protocole d'analyse 3D : « pilotage d'un avion »

3.3.1. Position des marqueurs

3.3.2. Installation et plateau de jeu

3.3.3. Description des tâches du protocole

3.3.4. Éléments d'amélioration apportés aux tâches de la V1.0 et intérêt des nouvelles tâches

3.3.5. Durée et déroulement de la passation

3.4. Sélection des données et extraction des paramètres cinématiques

3.5. Mesures cliniques

3.5.1. Consultation médicale

3.5.2. Bilan en kinésithérapie

3.5.3. Bilan en ergothérapie

3.6. Nombre de sujets nécessaires

3.7. Analyses statistiques

3.8. Éléments de faisabilité

3.8.1. Moyens humains

3.8.2. Organisation temporelle avec les étapes envisagées de réalisation

3.9. Autorisations réglementaires

4. Résultats

4.1. Caractéristiques de la population

4.1.1. Enfants PCu

4.1.2. Enfants sains

4.2. Comparaison entre BE-API V1.0 et V2.0 (tâches communes)

4.3. Résultats des nouvelles tâches de la V2.0

5. **Discussion**

Conclusion

Bibliographie

Tableau de référence des figures

Tableau de référence des tableaux

Annexe 1

Annexe 2

Annexe 3

4ème de couverture

Liste des abréviations

AHA: Assisting Hand Assessment

AMM: Autorisation de Mise sur le Marché

AVC : Accident Vasculaire Cérébral

BE-API: « Be An Airplane Pilot »

BFMF: Bimanual Fine Motor Function

CIF: Classification Internationale et Fonctionnelle du handicap

CHU : Centre Hospitalo-Universitaire

CPP : Comité de Protection des Personnes

IRM: Imagerie par Résonance Magnétique

MACS: Manual Ability Classification System

MAX: valeur maximale angulaire

MHC: Modified House Classification

MPR : Médecine physique et de Réadaptation

MS: Membre Supérieur

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

PC: Paralyse Cérébrale

PCu: Paralyse Cérébrale spastique unilatérale

ROM: amplitude de mouvement

V1.0: Version 1

V2.0: Version 2

Introduction

La Paralyse Cérébrale (PC) est la cause la plus fréquente de handicap moteur chez l'enfant. Sa forme unilatérale spastique représente un tiers des PC.

Les enfants atteints de Paralyse Cérébrale spastique unilatérale (PCu) ont des déficiences au membre supérieur (MS) altérant leurs activités du quotidien, en particulier dans les situations bimanuelles. L'analyse 3D est un outil objectif et précis qui permet de quantifier et mieux comprendre les anomalies du mouvement observées au niveau du MS parétique ainsi que les compensations adoptées, afin d'orienter les décisions thérapeutiques et évaluer leur efficacité. A ce jour, les protocoles d'analyse 3D du MS sont constitués de mouvement trop standardisés, monomanuels et éloignés des gestes du quotidien ou n'ont pas été validés en situation bimanuelle chez les enfants PCu. Dès lors, évaluer l'utilisation spontanée du MS parétique, en situation bimanuelle, au cours d'une session de jeu, serait un meilleur reflet de leurs mouvements au quotidien. Dans une précédente étude menée dans le service de Médecine Physique et de Réadaptation (MPR) au CHU de Rennes, il a été élaboré une première version d'un protocole 3D scénarisé composé de tâches bimanuelles appelé « Be An Airplane Pilot » (BE-API). La faisabilité et la reproductibilité inter-essais de ce protocole se sont avérées excellentes. Mais, ce protocole avait pour limites de ne pas être assez sollicitant sur certaines amplitudes du MS et de ne pas avoir été assez évalué sur les enfants les plus déficitaires.

Ce travail a pour but d'améliorer le protocole existant en proposant une nouvelle version, puis d'évaluer sa reproductibilité, sa validité et sa sensibilité au changement afin de pouvoir l'utiliser en routine clinique dans l'évaluation de la performance bimanuelle.

1. Revue de littérature

1.1. La Paralyse Cérébrale

1.1.1. Généralités

1.1.1.1. Définition

La PC est la première cause de handicap chez l'enfant (1).

Selon la définition du réseau de Surveillance de la Paralyse Cérébrale en Europe (SCPE) (2), la PC est un « ensemble de trouble du mouvement, de la posture et de la fonction motrice, permanents mais non évolutifs ; liés à une atteinte non progressive sur un cerveau en développement ». En d'autres termes, la PC résulte de lésions irréversibles survenues sur un cerveau immature. Ces lésions provoquent un ensemble de troubles non évolutifs du mouvement ou de la posture, souvent accompagnés de difficultés cognitives ou sensorielles, qui durent toute la vie. En fonction des lésions cérébrales, le handicap est très variable, allant de la simple boiterie à une atteinte grave de la motricité.

Le terme de PC (*Cerebral Palsy* en anglais) est la dénomination internationale qui remplace désormais les anciens termes définis par Tardieu, d'« infirmes moteurs cérébraux » et « infirmes moteurs d'origine cérébrale ».

1.1.1.2. Epidémiologie

La prévalence de la PC est d'environ 2 pour 1000 naissances vivantes (3), ce qui représente environ 17 millions de personnes dans le monde (1). Cependant, la prévalence globale semble diminuer selon plusieurs études récentes menées dans le monde entier (4-7). En Europe, Sellier et al (4) ont montré une diminution significative de la prévalence de la PC (1.77 pour 1000 naissances vivantes soit une baisse annuelle de 0.7% depuis 1980) et des atteintes significativement moins sévères.

Selon la Fondation Paralyse Cérébrale, il y a 125 000 personnes atteintes en France (1) avec un sex ratio H/F à 1.3.

1.1.1.3. Etiologies et facteurs de risque

Les étiologies de la PC peuvent être classées selon la période de survenue dans la vie de l'enfant (1,8):

- anténatale, en dehors de la prématurité (25% des enfants PC): accident vasculaire cérébral (AVC), malformation cérébrale, infections materno-fœtales (CMV, rubéole, toxoplasmose) ;

- périnatale (35% des PC): anoxie aigue per-partum, AVC néonatal, ictère nucléaire, infection néonatale, traumatisme crânien ;

- post-natale (10% des PC): infection, AVC (entre 28 jours et 2 ans avec une incidence de 1/2300 à 1/5000 naissances), traumatisme crânien, bas débit per-opératoire, maladie métabolique, convulsions sévères.

Dans 20 à 40% des cas, il n'y a pas d'étiologie identifiée.

Environ la moitié des enfants atteints de PC sont nés prématurés (24% entre 32 et 36 semaines d'aménorrhées et 24% avant 32 semaines d'aménorrhées) (1). La prématurité (avant 32 semaines d'aménorrhée) et un faible poids de naissance (inférieur à 1500 grammes) sont les principaux facteurs de risques (9).

1.1.1.4. Diagnostic

L'âge des acquisitions motrices étant variable, comme dans la population saine, le diagnostic ne peut pas être affirmé avant l'âge de 4 ans. Pour établir le diagnostic, il faut une histoire médicale compatible et un examen clinique en faveur (10). Le diagnostic n'est pas basé sur l'imagerie. Une IRM cérébrale doit néanmoins être réalisée pour rechercher une lésion responsable de la PC. Le type de lésion retrouvée dépend du moment de survenue pendant la grossesse : des anomalies du développement cérébral au 1^{er}-2^{ème} trimestre (9%), des lésions périventriculaire au début du 3^{ème} trimestre (56%) et des lésions de la substance grise à la fin du 3^{ème} trimestre (18%) (11,12). Il n'y a pas de lésion retrouvée à l'IRM dans 10% des cas. Une IRM cérébrale normale n'exclut pas le diagnostic de PC.

1.1.1.5. Les formes cliniques

En fonction du moment de survenue (anténatal, périnatal, post natal), de la localisation et de l'étendue de la lésion cérébrale, l'expression clinique de la PC sera différente.

On distingue différentes formes cliniques selon la nature du symptôme principal (spasticité, ataxie, dyskinésie) et la localisation (formes unilatérale versus bilatérale). Il existe ainsi 4 grandes formes: spastique unilatérale, spastique bilatérale, dyskinétique ou ataxique (13,14).

La forme spastique (trouble du tonus musculaire) représente 80 à 95% des PC, la dyskinésie (mouvements anormaux des membres) 4 à 17% et l'ataxie (hypotonie, trouble de l'équilibre) 2 à 5%. Il peut néanmoins exister des formes mixtes qui peuvent associer plusieurs composantes neurologiques

La forme spastique peut être subdivisée en fonction de la topographie de l'atteinte (*Figure 1*):

- les PC bilatérales: diplégie (atteinte motrice diffuse mais prédominant sur les deux membres inférieurs), quadriplégie (atteinte massive touchant les quatre membres et le tronc), triplégie (atteinte de trois membres, classiquement les deux membres inférieurs et un MS) ;

- les PC unilatérales: monoplégie (atteinte d'un seul membre) et hémiplégie (atteinte motrice d'un hémicorps, prédominant le plus souvent au MS).

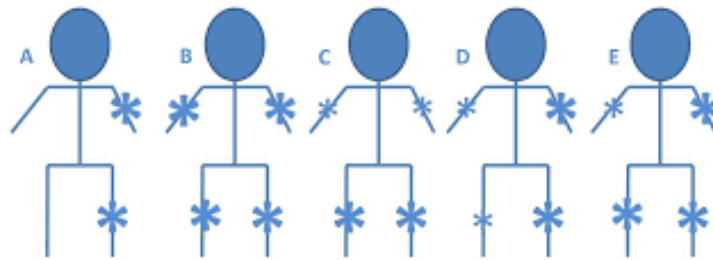


Figure 1 : Tableaux cliniques de la PC spastique. A: Hémiplégie, B: Quadriplégie, C: Diplégie, D: Diplégie asymétrique, E: Triplégie. La taille des astérisques représente le degré d'atteinte motrice. (d'après Dinomais M., 2013)

Les enfants atteints de PC peuvent avoir d'autres déficiences physiques et neurocognitives associées à leur atteinte motrice. On retrouve des troubles sensitifs, troubles cognitifs (20 à 50% des cas), troubles du langage, troubles neuro-visuels, dyspraxie visuo-spatiale, troubles de l'attention, troubles des fonctions exécutives (planification des tâches) et/ou de mémoire. Plus rarement, on retrouve des déficiences sensorielles (auditives ou visuelles). L'épilepsie est observée dans 20 à 40% des formes spastiques unilatérales (1).

1.1.2. Paralyse cérébrale spastique unilatérale (PCu) : modèle d'étude du membre supérieur

1.1.2.1. Spécificités cliniques

Avec une prévalence dans la population de 0,6 pour 1 000 naissances vivantes, la Paralyse Cérébrale spastique unilatérale (PCu) est la principale forme de PC chez les enfants nés à terme et la seconde après la diplégie chez les enfants nés prématurés (3).

Le déficit moteur unilatéral est lié à une atteinte corticale et de la voie descendante de l'exécution du mouvement (voie pyramidale) (*Figure 2*) . L'atteinte au niveau du MS est

variable selon les enfants, l'hémiplégie étant plus ou moins proportionnelle selon la localisation et l'étendue de la lésion cérébrale. Le déficit prédomine généralement sur les muscles extenseurs de poignet, supinateurs et sur la pince pouce-index (15).

La spasticité (ou hypertonie spastique) est définie comme une exagération des réponses à l'étirement phasique dépendante de la vitesse à laquelle on étire le muscle (16). Elle est plus fréquemment observée sur les muscles fléchisseurs du coude, pronateurs d'avant-bras, fléchisseur du poignet et des doigts chez les enfants atteints de PCu (15,17).

Ces déficiences au MS peuvent être associées à un trouble de la sélectivité motrice, des mouvements syncinétiques, co-contractions musculaires et difficultés de planification motrice (18). Des troubles de la sensibilité sont fréquemment associés.

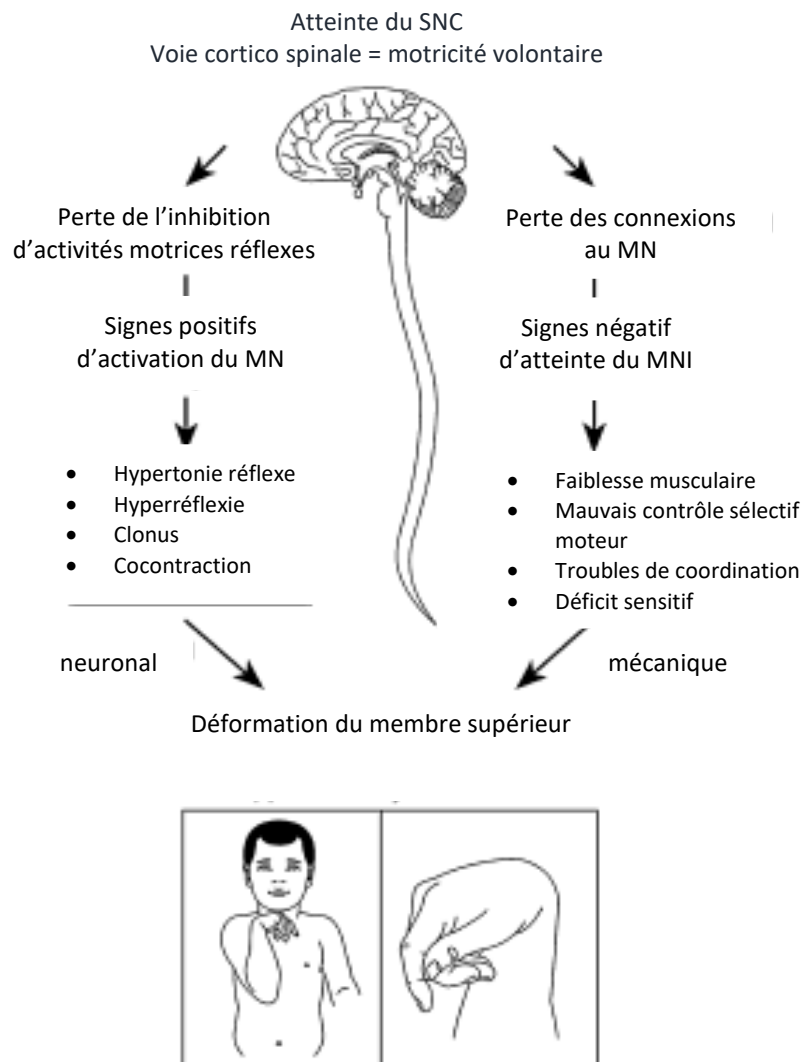


Figure 2 : Physiopathologie de l'atteinte du membre supérieur chez les enfants atteints de PCu. SNC : système nerveux central ; MN : Motoneurone (adapté et traduit en français d'après Bernard et al, 2014).

Avec la croissance de l'enfant, les muscles spastiques ne vont pas pouvoir s'étirer pour s'adapter à la croissance osseuse et vont se rétracter. Les muscles rétractés vont exercer des forces anormales sur le squelette qui va se déformer. Les muscles les plus enclins à se rétracter sont surtout ceux bi-articulaires (ex : biceps brachial). Les déformations orthopédiques vont donc progresser, alors que la lésion cérébrale causale est stable (*Figure 3*). Des compensations se mettent en place pour pallier à ces différentes anomalies.

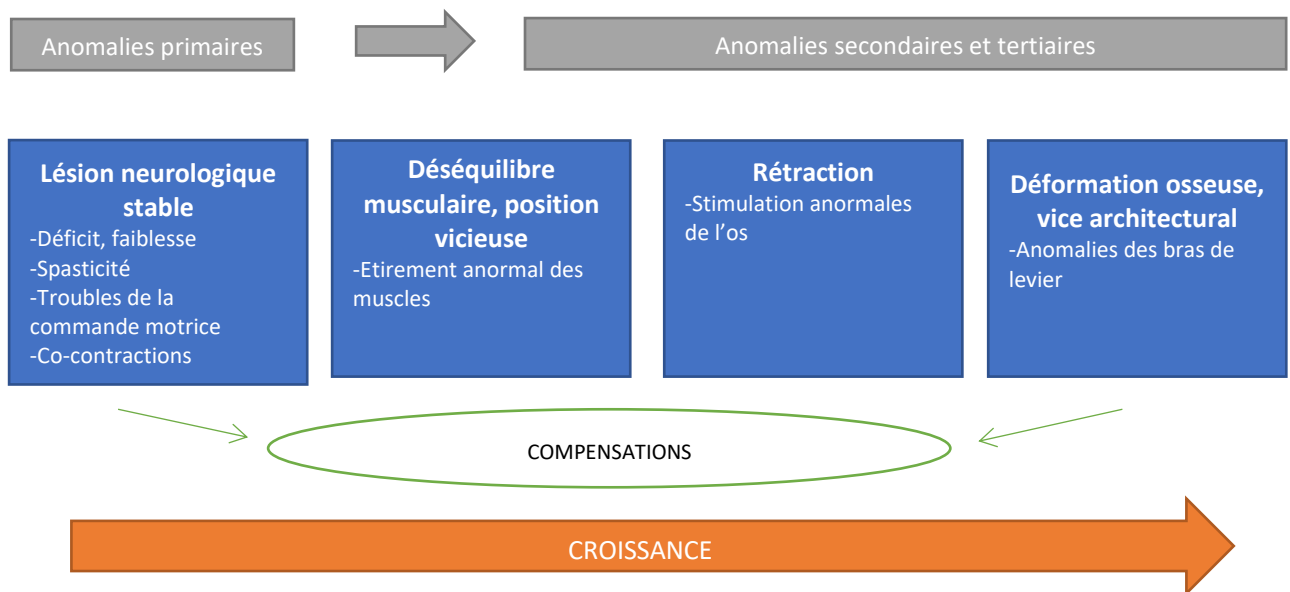


Figure 3 : Schéma des anomalies primaires, secondaires et tertiaires dans l'évolution de la PCu (adapté d'après Dinomais M., 2017)

Ces anomalies primaires, secondaires et tertiaires sont les cibles des traitements proposés par les médecins.

1.1.2.2. Traitements

Les prise en charge thérapeutiques sont variées et souvent associées entre elles (19). Elles répondent à des objectifs précis: amélioration fonctionnelle, renforcement musculaire, prévention de certaines complications, amélioration de la qualité de vie, etc...

Concernant le MS spastique, les traitements non chirurgicaux comprennent la rééducation (kinésithérapie, ergothérapie, activités physiques adaptés, psychomotricité), les traitements médicamenteux (toxines botuliniques, baclofène) et l'appareillage (orthèse de posture, de

fonction, etc...). De récentes recommandations ont été proposées par Novak et al (20) après évaluation de l'effet de l'ensemble de ces traitements. Concernant le MS, seules les injections de toxine botulinique intramusculaires et les techniques de rééducation spécifiques (la thérapie par contrainte induite, l'entraînement bimanuel, thérapie ciblée sur des objectifs et les programmes d'auto-rééducation au domicile) ont démontré leur efficacité.

Selon les recommandations HAS 2010 (21), les injections de toxine botulinique sont recommandées en première intention dans le traitement local de la spasticité permettant d'éviter l'enraidissement et les déformations osseuses, d'améliorer les amplitudes articulaires, la fonction motrice et la coordination motrice.

Des techniques chirurgicales peuvent être utilisées plus tardivement au cours de la croissance (à partir de 5-6 ans) et sont définitives telles que la neurotomie sélective, les gestes tendino-musculaires (aponévrotomie, allongement tendineux et désinsertion musculaire, transferts tendineux) et les arthroèses.

Le but de ces thérapeutiques est de limiter les désavantages liés au handicap chez ces enfants.

1.2. Evaluation fonctionnelle des membres supérieurs chez les enfants atteints de PCu

1.2.1. Les outils d'évaluation clinique

1.2.1.1. Modèle de la CIF

La Classification Internationale du Fonctionnement, du Handicap et de la Santé (CIF) (*Figure 5*) a été proposée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) en 2001 (22) pour décrire la pathologie à l'origine du handicap en utilisant l'interaction dynamique entre trois composantes centrales ; les déficiences, les limitations d'activité, les restrictions de participation ; sur lesquels vont interagir les facteurs environnementaux ou personnels de l'individu.

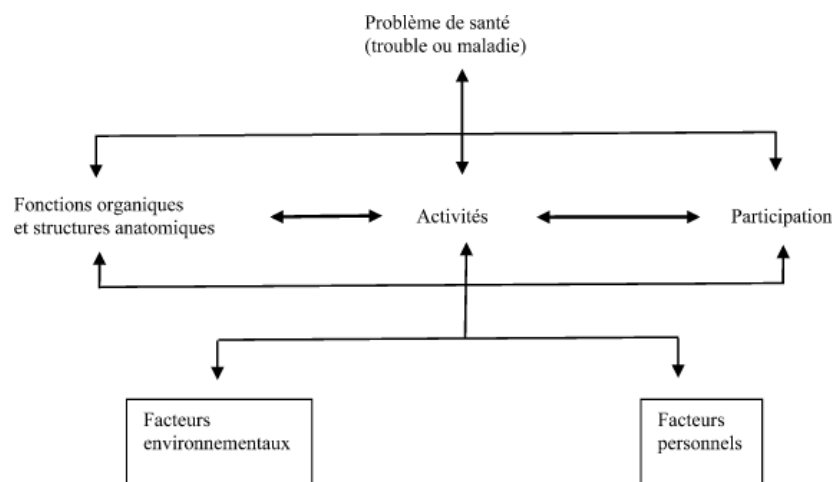


Figure 4 : Modèle de la CIF (22)

L'atteinte sensori-motrice du MS dans la PCu se traduit par des limitations d'activité avec des difficultés de préhension et manipulation d'objet, en particulier lorsque les deux mains deviennent nécessaires (boutonner une chemise, remonter une fermeture éclair, faire les lacets, couper sa viande, ouvrir une bouteille...). Ces limitations d'activité amènent l'enfant à utiliser principalement le membre sain, y compris en situation bimanuelle, entraînant une sous-utilisation du membre parétique (23) et une latéralisation précoce au profit de la main saine. On estime que 30% des enfants atteints de PC présenterait une détérioration de leurs capacités fonctionnelles dans une situation bimanuelle (24). Ces limitations d'activité sont responsables d'une restriction de participation se traduisant par une altération de l'autonomie dans les activités de la vie quotidienne.

De nombreux outils cliniques (évaluations, classifications, questionnaires) existent dans la littérature pour quantifier l'atteinte des membres supérieurs chez ces enfants (25). Ils permettent de plus facilement comparer l'enfant dans le temps pour voir sa progression par rapport à lui-même, de le comparer aux enfants de son âge, lorsque le test est normé, et aussi de mesurer l'efficacité des thérapeutiques. Les outils de mesure sont caractérisés par leurs qualités psychométriques : la validité, la reproductibilité et la sensibilité au changement (26). Des auteurs ont proposés une classification de ces outils cliniques selon les domaines de la CIF (19) (*Annexe I*).

Dans le domaine de l'activité, on distingue les moyens d'évaluation portant sur la capacité unimanuelle de ceux sur la performance bimanuelle.

- La capacité unimanuelle est l'aptitude qu'a l'enfant à accomplir une tâche ou mener une action en situation de test avec son MS parétique, dans un environnement normalisé, alors qu'il s'en sert habituellement en membre d'appoint. Elle définit le niveau de fonctionnement le plus élevé qu'il est susceptible d'atteindre, ce que l'enfant « peut faire » lorsqu'on le sollicite sur demande.

- La performance bimanuelle est ce que l'enfant fait dans son cadre de vie habituel, autrement dit ce qu'il est réellement capable de faire en situation « écologique », c'est-à-dire ce que l'enfant « fait spontanément » avec son membre parétique et qui implique une influence des facteurs environnementaux.

1.2.1.2. Classifications de la fonction manuelle

La Manual Ability Classification System (MACS) (27) est une échelle fonctionnelle globale décrivant le niveau de manipulation. Elle prend en compte le mouvement dans sa globalité mais n'évalue pas la participation de chaque main dans la réalisation du geste. A la différence de l'échelle Bimanual Fine motor Function (BFMF) (28), dérivée de la MACS, prend en compte indépendamment l'action des deux mains dans leur capacité de maniement d'objets. La Classification de House modifiée (MHC) (29), évalue l'utilisation spontanée de la main atteinte (*Annexe 2*).

1.2.1.3. Echelles d'évaluation de la performance bimanuelle

La performance bimanuelle semble être le meilleur reflet des conditions réelles d'utilisation des membres supérieurs et peut être évaluée à l'aide de plusieurs outils validés dans cette population (*Annexe 2*).

Assisting Hand Assessment (AHA)

L'AHA est une échelle validée pour les enfants PCu âgés de 18 mois à 18 ans (30,31). Elle évalue l'efficacité de l'utilisation de la main assistante dans les activités bimanuelles à l'aide d'un score vidéo filmé. L'AHA est considéré à ce jour comme le gold standard pour évaluer la performance bimanuelle et est utilisé pour évaluer l'efficacité de différents traitements sur le MS des enfants PCu (32). Mais ses propriétés psychométriques ont été récemment remises en cause, suggérant qu'elle manquait de sensibilité et reproductibilité (33). Ce biais peut être amélioré par l'utilisation de la dernière version 5.0 (34).

Abilhand kids

L'Abilhand-Kids est un questionnaire validé pour les enfants PCu âgés de 6 à 15 ans (35), rempli par les parents, qui évaluent des activités de la vie quotidienne bimanuelles. Une bonne validité, fiabilité et sensibilité au changement (36) de ce questionnaire ont été démontrées.

L'utilisation combinée de ces classifications permet une observation plus complète et pertinente. Cependant, bien qu'ayant démontré leur excellentes qualités psychométriques, ces évaluations cliniques ont pour principale limite leur subjectivité. Dès lors le recours à d'autres systèmes comme les nouvelles technologies permet d'obtenir une évaluation objective et précise du mouvement des MS chez les enfants atteints de PCu.

1.2.2. Analyse 3D du mouvement des membres supérieurs

Grâce aux systèmes de capture du mouvement qui apportent des données précises et objectives, il est désormais possible d'enregistrer et quantifier les mouvements observés.

1.2.2.1. Définition de l'analyse 3D des membres supérieurs

Un système optoélectronique est un outil non invasif qui permet d'enregistrer le mouvement à l'aide de caméras infrarouges et de marqueurs réfléchissants placés sur des repères anatomiques précis du corps selon les recommandations de l'International Society of Biomechanics (ISB) (37). Les infrarouges générés par la caméra sont réfléchies sur les marqueurs, ce qui permet de reconstruire la position en 2D puis en 3D de chaque marqueur à l'aide d'un logiciel d'acquisition 3D du mouvement. Le déplacement de ces marqueurs peut ainsi être traduit numériquement en se basant sur un modèle biomécanique.

Depuis de nombreuses années, l'analyse 3D est utilisée en routine clinique pour l'analyse quantifiée de la marche (38). L'exploration du mouvement du MS s'est développée plus récemment, et est plus difficile en raison de la nécessité de prendre en compte la diversité et complexité des mouvements réalisables au MS (39). Il doit être pris en considération le grand nombre de degrés de liberté, la multitude de tâches réalisables et la possibilité de mettre en place plusieurs stratégies motrices pour une même finalité de mouvement doivent être pris en considération.

La mise en place de protocoles validés et standardisés permet de réaliser des mesures précises et reproductibles afin de connaître l'intérêt clinique et scientifique de l'outil. Dans la littérature,

les protocoles élaborés pour explorer le MS déficitaire portent majoritairement sur des tâches monomanuelles, évaluant la capacité manuelle et non la performance bimanuelle.

1.2.2.2. Protocoles monomanuels

Dans une revue de littérature systématique réalisée par Jaspers et al. en 2009 (40), il est décrit des protocoles variables, étudiant des tâches simples à complexes, allant du simple pointage à des tâches mettant en œuvre de la motricité fine. Les mouvements les plus fréquemment étudiés sont ceux d'atteinte et de préhension, de déplacement de la main à la bouche, et de flexion/extension et pronation/supination du coude. Les paramètres spatiotemporels ont été largement étudiés mettant en évidence une durée de mouvement plus longue, vitesse de déplacement et trajectoire en ligne droite réduite chez les enfants PCu comparés aux enfants sains ou à leur MS sain ; alors que la cinématique articulaire a été moins explorée. Dans la majorité des études, les enfants atteints de PCu utilisaient moins d'extension du coude et supination pour atteindre un objet, compensée par une flexion accrue du tronc. Les limites de ces protocoles étaient de ne pas être standardisés et de ne pas utiliser les normes ISB (41-47). Fitoussi et al, sont les premiers à avoir étudié la reproductibilité intra et intersession des courbes cinématiques et des amplitudes articulaires. Ils ont aussi étudié la sensibilité au changement par l'effet pré/post injections de toxine botulinique au MS chez 8 enfants PCu (48) mettant en évidence des changements cinématiques sur les DDL en distalité par effet du traitement (moins de pronation et plus de déviation ulnaire de poignet) et en proximal par compensation (inclinaison homolatérale et extension du tronc, abduction et rotation externe, flexion de coude). Kreulen et al. se sont principalement intéressés à la pronosupination d'avant-bras et ont étudié la sensibilité au changement par comparaison pré et post chirurgie sur les muscles pronateurs montrant plus de supination sur les 2 premières tâches et moins de pronation, une flexion de coude et rotation interne d'épaule augmentée sur la tâche 3 (49).

Butler et al. (50), au cours d'une tâche où il faut atteindre et attraper un verre, ont étudié les données cinématiques d'épaule, coude et poignet ainsi que les paramètres spatiotemporels de 25 enfants PCu comparé à 25 enfants sains. La reproductibilité du protocole n'a pas été étudiée. A partir des paramètres spatiotemporels, ils ont développé le Pediatric Upper Limb Motion Index (PULMI) et le Pediatric Upper Limb Temporal and Spatial Equation (PULTSE) (51). Ces indices permettent de quantifier la qualité du mouvement et de préhension par rapport au mouvement d'enfant sains, et de distinguer les sous-types d'atteinte des enfants PCu.

C'est principalement avec Jaspers et al. Que l'étude de la quantification des anomalies du mouvement des enfants PCu s'est développée (52-55). Ils ont établi un protocole composé de 8 tâches monomanuelles (3 tâches de « pointage » ; 3 tâches « fonctionnelles » main vers le corps et 2 tâches « approcher pour saisir »). Ils ont démontré la fiabilité intra et inter session de ce protocole. Ils ont comparé le mouvement de chaque enfant PCu à la base de données « valides » sur des paramètres spatiotemporels, et cinématiques (maximum et minimum angulaire / amplitude articulaire active totale / angle au point le plus extrême) afin d'établir des scores par tâche, par degré de liberté et global. Le Global Arm Profile Score (APS), résume la déviation globale du mouvement du MS par rapport à la norme, significativement plus élevé chez les enfants PCu, et le Global Arm Variable Score (AVS), qui représente les déviations de mouvement pour une articulation donnée. La corrélation de ces scores cinématiques avec la Classification de House a été démontrée

Riad et al. (56) ont comparé l'APS et l'amplitude de mouvement (ROM) minimum et maximum de 35 enfants PCu et 15 enfants sains. Ils ont aussi comparé des index différentiels à partir de ces paramètres (APS index et ROM index). Mailleux et al (57), avec le protocole de Jaspers, ont mis en évidence des corrélations faibles à modérées significatives sur l'extension de poignet, adduction de poignet, plan d'élévation d'épaule et rotation du tronc avec le niveau MACS. Ils ont montré des limitations d'amplitude plus importantes chez les enfants MACS III que les MACS I et II pour les mobilités d'épaule, en faveur d'une sensibilité de l'analyse 3D à l'atteinte motrice. Cette équipe est la seule à avoir étudié la corrélation des paramètres cinématiques aux lésions cérébrale à l'IRM, démontrant ainsi que l'atteinte motrice est influencée par la localisation et l'étendue des lésions quand il y a une atteinte corticale et de la substance grise (lésion de survenue tardive) et en particulier lorsque la corne postérieure de la capsule interne est touchée. Gaillard et al (58) ont aussi montré des déviations plus importantes du mouvement chez les enfants PCu. Ces derniers ont réalisés le protocole de Jaspers et al, avec une forte corrélation de l'APS et l'AVS pour articulations distales avec l'AHA.

1.2.2.3. Protocoles bimanuels

Seulement deux études ont décrit un protocole d'analyse 3D en situation bimanuelle chez les enfants PCu, permettant d'être au plus près de la stratégie motrice spontanée.

Klotz et al. (60) ont étudié les mouvements de 16 enfants atteints de PCu et 17 sains sur 4 tâches monomanuelles (boire un verre ; manger avec une cuillère ; ouvrir une porte ; toucher une bouteille puis son nez avec l'index) et sur 2 tâches bimanuelles (transvaser une tasse 6 fois (3

fois de chaque côté) et bouger une boîte (3 fois)). Ils n'ont pas exploré les mouvements du poignet. Ils ont rapporté une augmentation du temps de mouvement et une pronation réduite chez les enfants PCu. La pronation était augmentée dans le sous-groupe MACS III comparé à MACS I ou sain ; la flexion/extension du tronc était augmentée chez les MACS II et III. Dans la tâche 4, ils ont trouvé une corrélation positive entre la pronation et le score MACS. Il n'y avait pas de corrélation significative entre l'Abilhand-Kids et les paramètres cinématiques.

Rudisch et al. (61) ont fait réaliser à 37 enfants PCu une tâche consistant à ouvrir une boîte d'une main et appuyer sur un bouton de l'autre main. Cette tâche était réalisée avec le MS parétique puis avec le MS sain. Ils ont obtenus des corrélations à la CHEQ et Jebsen-Taylor. Ils ont mesuré les paramètres spatiotemporels mais n'ont pas exploré de paramètres cinématiques. Il n'y a pas eu d'étude de la reproductibilité du protocole.

Ces 2 études portent sur un nombre de tâches très limité et ces protocoles n'ont pas été validés (pas d'étude de reproductibilité des tâches notamment), ce qui ne permet pas leur utilisation en tant qu'outil d'évaluation diagnostique et thérapeutique.

En conclusion, les protocoles d'analyse 3D du mouvement des membres supérieurs existants ont permis de mettre en évidence des différences significatives sur la rotation externe d'épaule, extension de coude, supination d'avant-bras, flexion et adduction de poignet en comparaison à des enfants sains ainsi que d'établir des corrélations avec des outils d'évaluation clinique, pour les études les plus récentes. Cependant, l'exploration du mouvement en situation bimanuelle, plus proche de la vie réelle, reste insuffisante et il n'y a pas de protocole validé à ce jour pour cette évaluation.

2. Contexte de l'étude et objectifs

A ce jour, les protocoles d'analyse 3D des MS chez les enfants atteints de PCu sont constitués de mouvement trop standardisés, monomanuels et éloignés des gestes du quotidien. Seulement deux études ont décrit des mises en situation bimanuelle, mais elles portent sur un nombre de tâches limitées et n'ont pas été validées. Dès lors, le développement et la validation d'un protocole d'analyse 3D comprenant des tâches bimanuelles, proches de celles réalisées par les enfants dans la vie quotidienne, serait le meilleur reflet de leur stratégie motrice.

Cette étude s'inscrit dans la continuité des travaux de recherche en analyse 3D du mouvement menés dans le service de Médecine Physique et de Réadaptation (MPR) Enfant du CHU de Rennes, en partenariat avec le laboratoire « Mouvement Sport Santé » (M2S), EA 7470, de l'Université Rennes 2.

Dans une première étude exploratoire, Lisa Martins a exploré 21 tâches bimanuelles en analyse 3D chez 17 enfants sains afin d'identifier celles qui seraient pertinentes pour évaluer la fonction motrice des MS chez les enfants PCu. Ces tâches devaient refléter au mieux toutes les possibilités de mouvements du MS en étant reproductibles, discriminantes et écologiques. Elle a mis en évidence la difficulté de créer un protocole adapté à une population ciblée et contraint par la standardisation pour que les mouvements soient reproductibles.

En 2016, le Dr Florence Gaillard, médecin MPR et en thèse de science à Rennes 2, a sélectionné une tâche du quotidien, « boire bol », pour étudier le mouvement de préhension bimanuel. L'analyse cinématique de la prise du bol a été évaluée chez 28 sujets valides et 17 enfants PCu. Il s'est avéré que le mouvement n'était pas assez contraint avec plusieurs stratégies motrices possibles dans la population valide : supination et support de la main, neutre et support des doigts, légère pronation et pince des 2 mains, etc... Dès lors, pour rendre compte de la différence de réalisation du geste par les enfants atteints de PCu, la symétrie de prise du bol par les deux mains a été étudiée en créant un index d'asymétrie. Les enfants PCu étaient significativement plus asymétriques que les sujets sains.

En 2017, afin d'étudier un plus grand nombre de mouvements au MS et de rendre compte plus globalement de la stratégie motrice des enfants PCu en situation bimanuelle, le Dr Florence Gaillard et son équipe ont inventé un protocole d'analyse 3D appelé « Be An Airplane Pilot » (BE-API). Il était composé de tâches bimanuelles, réalisées au cours d'une session de jeu où

l'enfant « pilote un avion ». Le contexte ludique permettait à l'enfant de ne pas se sentir en situation de "test" et d'utiliser spontanément sa main auxiliaire lors de la manipulation d'objets nécessitant normalement les deux mains. Chaque tâche a été conçue pour mobiliser spécifiquement les degrés de liberté (DDL) d'épaule, du coude et du poignet, dont les amplitudes sont connues pour être limitées chez les enfants atteints de PCu. Dans cette étude, sur 20 enfants PCu (âge moyen 12.0 ± 3.2 ans) et 20 enfants sains (âge moyen $11,9 \pm 3.4$ ans), la reproductibilité inter-essais des courbes cinématiques, amplitudes de mouvement (ROM), et valeurs angulaires maximales (MAX) s'est avérée excellente (CMC entre 0.82 et 0.98 ; ICC entre 0.75 et 0.99 ; $SEM < 5^\circ$) et (pour toutes les tâches sur leur DDL primaires). Le protocole mettait en évidence des différences cinématiques entre ces deux populations sur la rotation externe d'épaule, extension de coude, supination d'avant-bras, flexion et adduction de poignet ($p < 0.02$). Cependant, cette première version du protocole BE-API avait pour limite de ne pas être assez sollicitante sur certains degrés de liberté, notamment au niveau de l'épaule, et il n'y avait pas assez d'enfants avec un déficit sévère (MACS III) ayant réalisé le protocole. Les scores d'évaluation de la performance bimanuelle n'étaient que modérément corrélés aux paramètres cinématiques (AHA : $r=0.48-0.65$; Abilhand-kids : $r=0.48-0.49$). Ce qui montrait l'intérêt de développer d'autres paramètres ou indices permettant de rendre compte de la stratégie motrice chez ces enfants et pouvant être mieux corrélés à la clinique.

L'étude actuelle a pour but d'améliorer le protocole BE-API en proposant une nouvelle version (V2.0) répondant aux facteurs limitants précédemment cités. Ensuite, afin de valider la V2.0 en tant qu'outil d'évaluation diagnostique et clinique, il sera étudié : 1) la reproductibilité inter-jour des paramètres cinématiques (MAX et ROM) et courbes angulaires ; 2) la validité de construit par la comparaison des courbes et paramètres cinématiques entre les enfants PCu et sains ; 3) la validité convergente par l'étude de la corrélation des paramètres cinématiques avec les scores cliniques (MACS, MHC, BFMF) et échelles d'évaluation de la performance bimanuelle (AHA et Abilhand Kids) et 4) la sensibilité au changement par la comparaison des courbes et paramètres cinématiques avant et après traitement (injections de toxine botuliniques dans une indication de traitement local de la spasticité).

Objectif principal du mémoire de Master 2:

Améliorer la version 1.0 du protocole d'analyse 3D bimanuel BE-API chez les enfants atteints de PCu.

3. Méthode

Etude prospective, monocentrique (CHU Rennes), comparative, de validation d'un outil diagnostique et thérapeutique.

3.1. Population concernée

Vingt enfants atteints de PCu seront recrutés parmi les patients suivis dans le service de MPR Enfant du CHU de Rennes. Les critères d'inclusion sont les suivants: 1) âge compris entre 6 et 17 ans inclus, 2) niveau de manipulation suffisant pour réaliser les tâches du protocole (score MACS (29) I à III). Les critères de non inclusion sont : 1) déficit cognitif gênant la compréhension des consignes ou troubles visuel ne permettant pas la visualisation du plateau de jeu, 2) douleur du membre supérieur (score EVA>3), 3) chirurgie du membre supérieur ou injections de toxines botuliniques dans les 3 mois précédant l'inclusion.

La population d'enfants PCu sera comparée à vingt enfants sains de même âge, recrutés sur la base du volontariat parmi les enfants du personnel du CHU de Rennes (sauf service de MPR Enfant pour éviter les liens de sujétion) ou du laboratoire M2S.

3.2. Déroulement de l'étude

3.2.1. Pour le groupe : enfants atteints de PCu

Les enfants atteints de PCu et leurs parents ont été recrutés soit lors des consultations de suivi habituelles avec leur médecin de MPR référent soit par contact téléphonique par Marine Cacioppo, interne en médecine.

Lors du recrutement, nous avons cherché à avoir une répartition plus homogène des niveaux MACS, que dans la V1.0 du protocole, avec notamment plus d'enfants très déficitaires (MACS III).

L'analyse 3D n'est habituellement pas réalisée de façon courante dans le service de MPR Enfant. Les enfants inclus dans l'étude ont réalisé l'analyse 3D deux fois, dans le cadre de la recherche, entre 2 et 4 semaines d'intervalle, pour évaluer la reproductibilité inter-jour du protocole (*Figure 6*).

Lors de la première visite, les enfants atteints de PCu ont réalisé un bilan en kinésithérapie (mesures des amplitudes articulaires passives et actives par goniométrie, évaluation de la force motrice, sélectivité motrice, spasticité, force de préhension et pince pouce-index) et en

ergothérapie (AHA, Abilhand-Kids) qui sont des bilans réalisés en pratique clinique courante dans le service pour le suivi et l'évaluation de l'efficacité des traitements (rééducation, toxines botuliniques, chirurgie neuro-fonctionnelle ou orthopédique). Dans le cadre de la recherche, ils ont réalisé en plus l'analyse 3D du protocole BE-API.

La 2^{ème} analyse 3D est réalisée lors d'une visite ajoutée par la recherche.

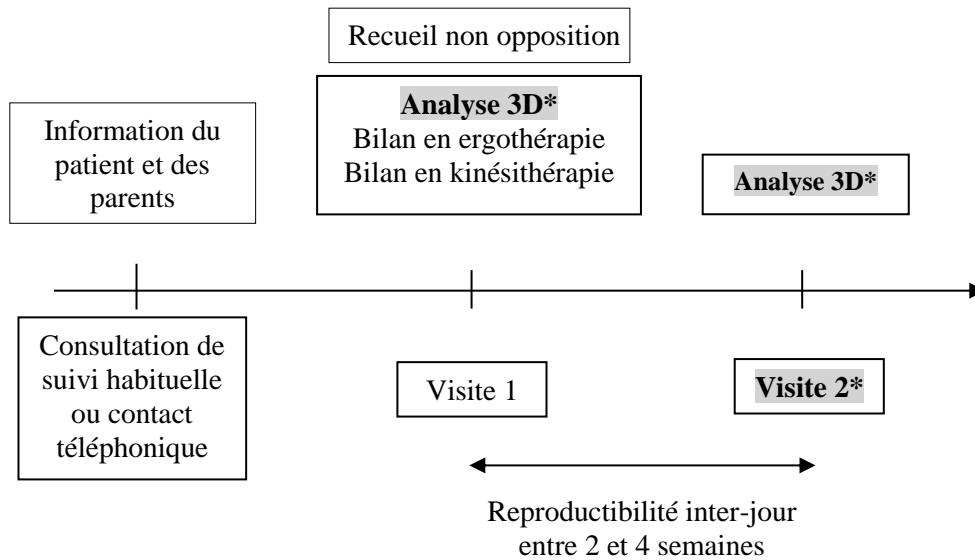


Figure 5 : Déroulement de l'étude chez les enfants atteints de PCu (*ajoutés par la recherche)

3.2.2. Pour le groupe : volontaires sains

Les enfants sains ont réalisé le protocole d'analyse 3D une seule fois, au cours d'une visite avec information des parents et recueil du consentement.

3.3. Protocole expérimental d'analyse 3D : « pilotage d'un avion »

Les analyses 3D se sont déroulées dans la salle d'analyse du mouvement du service de MPR Enfant du CHU de Rennes.

Les données cinématiques ont été recueillies à l'aide de 10 caméras optocinétiques (caméras infrarouges, VICON®), qui capturent le mouvement de 26 marqueurs placés au niveau des deux membres supérieurs et du tronc de l'enfant, selon les normes de l'International Society of Biomechanics (37). Un set de marqueurs de 9mm adapté à l'anthropométrie des enfants a été utilisé.

3.3.1. Position des marqueurs

Les marqueurs réfléchissants ont été placés de la façon suivante (*Figure 6*) :

- A chaque membre supérieur :
 - 2 sur les têtes du 2^{ème} et 5^{ème} métacarpiens
 - 2 sur les styloïdes radiale et ulnaire
 - 2 sur les épicondyles du coude
 - 1 sur l'acromion
- Face antérieure du tronc
 - 1 entre les 2 clavicules
 - 1 sur le sternum
- Face postérieure du tronc
 - 2 sur les épineuses rachidiennes (C7 et T10)
- En supplément, pour le repérage gauche/droite :
 - 4 marqueurs formant un « carré » sur le bras droit
 - 4 marqueurs formant un « losange » sur le bras gauche

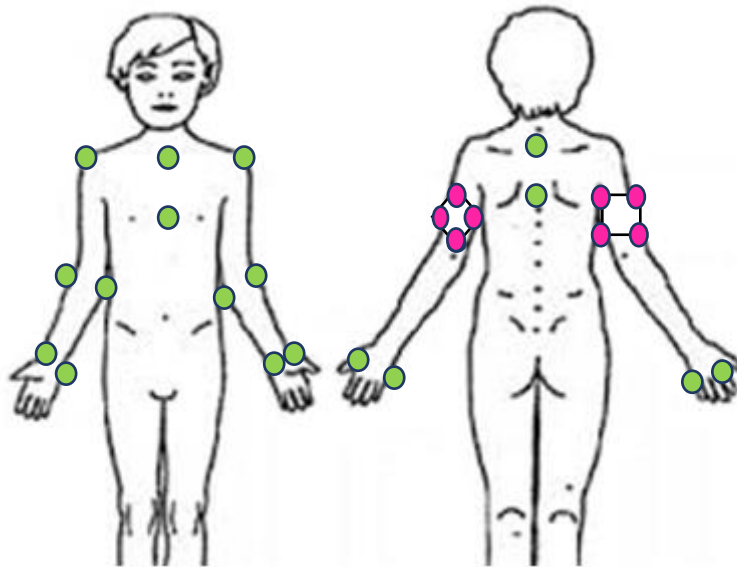


Figure 6 : schéma de la position des marqueurs sur le corps d'un enfant vue de face et dos (en vert : marqueurs selon les normes ISB ; en rose : marqueurs pour repérage gauche/droite)

3.3.2. Installation et plateau de jeu

L'enfant est installé sur une chaise à hauteur d'assise et repose-pied variables (matériel adapté et agréé pour la pédiatrie), dos droit, genoux et hanches fléchis à 90°. Une table à hauteur variable est installée devant l'enfant, sur laquelle sont disposés les éléments du plateau de jeu :

manette, volant, joystick, buzzer, tableau de bord aimanté, jetons et boîte à carburant, comme illustrés en *Figure 8*. Des mesures préalables sur l'enfant permettent de définir le placement des objets à manipuler et la largeur/hauteur du volant en fonction de son anthropométrie.

La position de départ choisie est coudes fléchis à 90° avec les avant-bras posés sur la table, mains tournées paume contre la table, épicondyles en bord de table et dos droit (*Figure 9*).



Figure 7 : Plateau de jeu de BE-API V2.0 correspondant au « poste de pilotage »

3.3.3. Description des tâches du protocole

Il s'agit d'une session de jeu où l'enfant « pilote un avion » et réalise successivement cinq tâches bimanuelles pour amener à une utilisation spontanée du membre parétique en situation ludique. Chaque tâche a été conçue pour mobiliser dans de larges amplitudes les degrés de liberté connus comme étant limités chez les enfants PCu (42,43,44), à savoir l'extension de coude, la supination, l'extension et les déviations de poignet, l'élévation et l'abduction d'épaule.

○ Tâche 1 : « montagnes »

L'enfant descend et remonte le volant avec les 2 mains. Cette tâche vise à explorer la flexion-extension de coude et la déviation ulnaire-radiale de poignet.



○ Tâche 2: « slaloms »

L'enfant tient le joystick avec la main saine et fait tourner la manette avec la main atteinte à 90° vers le haut puis 90° vers le bas. Cette tâche vise à explorer la rotation interne-externe d'épaule.



○ Tâche 3: « tempête » → nouvelle tâche

L'enfant attrape un aimant sur la table avec sa main atteinte (non-dominante), posé à côté de son membre supérieur parétique (non-dominant) dans l'alignement avec son tronc. Il vient ensuite l'accrocher le plus haut possible sur un panneau aimanté, placé à longueur du membre supérieur et orienté à 45° par rapport à l'axe horizontal devant lui, du côté hémiparétique (non-dominant). En même temps, sa main saine (dominante) maintient le volant horizontal. Cette tâche vise à explorer l'élévation et l'abduction d'épaule.

Photo

○ Tâche 4: « parachutistes » → nouvelle tâche

L'enfant tire vers lui puis ramène vers l'avant une manette placée du côté hémiparétique (non-dominant) avec sa main atteinte (non dominante) pendant que sa main saine (dominante) maintient le volant horizontal. Cette tâche vise à explorer la flexion-extension de poignet.

Photo

○ Tâche 5: « carburant »

A la fin de chaque tâche, l'enfant réalise un mouvement de supination avec sa main du côté hémiparétique (non-dominant) à partir de la position de départ (paume sur la table soit en pronation) pour recevoir un jeton. L'autre main appuie sur le buzzer. Cette tâche vise à explorer la pronosupination libre de l'avant-bras.



3.3.4. Eléments d'amélioration apportés aux tâches de la V1.0 et intérêt des nouvelles tâches

La première version comportait 4 tâches.

Les tâches « montagnes », « slalom » et « carburant » n'ont pas été modifiées. Elles avaient permis de montrer des différences significatives sur l'extension de coude, l'adduction de poignet, la rotation externe d'épaule et la supination entre enfants PCu et sains.

Une tâche « parachutiste » consistait à venir appuyer sur un buzzer placé du côté hémiplegique dans l'alignement du tronc, à 70% de la longueur du bras, avec le membre déficitaire (non dominant). Pendant ce temps, l'autre main maintenait le volant horizontal (cf photos ci-dessous). Cette tâche visait initialement à étudier la rotation externe d'épaule.



Or, il a été montré que les enfants réalisaient naturellement une rotation interne d'épaule pour atteindre le buzzer. Cette tâche n'était finalement pas discriminante sur l'épaule mais intéressante sur la flexion/extension de poignet, ce qui a finalement été étudié en DDL principal. De plus, la rotation interne d'épaule était également sollicitée dans la tâche « slalom », qui est une tâche en chaîne fermée. Nous avons donc décidé de retirer cette tâche et d'étudier la rotation interne/externe d'épaule en DDL primaire dans la tâche « slalom » uniquement. Le scénario du saut des parachutistes a été conservé pour illustrer une nouvelle tâche.

La tâche « tempête » a été ajoutée pour explorer plus spécifiquement les DDL d'épaule : l'élévation et l'abduction. Ces mouvements sont réalisés sans être contraints par un objet, en chaîne ouverte. Cette tâche est intéressante pour suivre un mouvement sur une longue trajectoire

et peut permettre l'exploration de la fluidité du mouvement (par l'index de courbure). Son intérêt est aussi de pouvoir permettre l'étude de la prise, saisie et manipulation d'un objet (aimant), puis son déplacement, le pointage et le lâchage de l'objet c'est-à-dire tous les types de manipulations utilisés dans la vie quotidienne. Le tableau de bord a été fabriqué pour le protocole et est réglable en hauteur pour s'adapter à la taille de l'enfant (*Figure 7*). La forme de l'aimant est hexagonale avec une hauteur de 3cm de côté pour permettre à tous les enfants de pouvoir attraper l'objet, y compris les enfants MACS III.

La nouvelle tâche « parachutiste » a nécessité la fabrication d'une nouvelle manette (photo ci-dessous). Elle permet de solliciter plus spécifiquement la flexion et extension de poignet en chaîne fermée. Ces amplitudes étaient explorées dans la V1.0 seulement contre pesanteur : lorsque l'enfant venait appuyer sur un buzzer placé du côté hémiplégique, il s'agissait d'étudier le maintien du poignet en position neutre contre pesanteur, sans excès de flexion, lors d'un mouvement de déplacement horizontal pour atteindre un buzzer.



Pour favoriser l'immersion des enfants dans le contexte de jeu, le décor de la salle d'analyse du mouvement a été amélioré avec la projection d'un diaporama illustrant les différentes missions (images libres de droit, non animées) et adapté aux tranches d'âge des participants (dessin pour les plus jeunes, photos de paysage réels pour les plus grands) (*Figure 8*).



Figure 8 : Environnement ludique lors d'une acquisition 3D avec projection d'un diaporama

3.3.5. Durée et déroulement de la passation

Le protocole d'analyse 3D dure environ 30 minutes : 10 minutes d'installation (marqueurs et calibration de l'environnement), 10 minutes d'explication et 10 minutes de protocole (réalisation/acquisition).

Comparativement à BE-API V1.0, le temps de passation a été réduit. Les enfants réalisaient 3 fois de suite le « jeu d'avion » soit 3 essais au cours d'une même analyse 3D afin d'explorer la reproductibilité inter-essais. La reproductibilité s'est avérée excellente sur la V1.0. La variabilité inter-jour évalue plus de paramètres pouvant entraîner une variation extrinsèque dans les mesures (remplacement des marqueurs, jours différents, enfant et expérimentateur dans des conditions différentes, etc...) et sera évaluée dans cette étude. Le raccourcissement du temps de passation permet de favoriser l'adhésion de l'enfant et d'améliorer son attention et sa concentration pour bien réaliser le protocole. La réalisation d'un seul essai est plus proche de ce qui pourrait être proposé en pratique courante et permet d'étudier la faisabilité du protocole en condition réelle.

L'adhésion de l'enfant au jeu d'avion a été évaluée par une EVA satisfaction à la fin de la première session.

3.4. Sélection des données et extraction des paramètres cinématiques

Une session correspond à la conduite d'un avion qui consiste à réaliser les 5 tâches. Les tâches 1, 2, 3 et 4 sont composées de 5 répétitions de mouvements (= 5 cycles). La tâche 5 est réalisée à la fin des tâches 1-2-3-4 (= 1 cycle) pour contribuer au scénario de jeu et lier les autres tâches. Concernant les tâches 1-2-3-4, tous les cycles sauf le 1er seront conservés afin d'éviter le biais de début de tâche. Au total, 20 cycles de mouvements seront retenus pour l'analyse de l'ensemble du protocole (*Figure 9*).

Dans la V1.0, en se basant sur protocole de Jaspers et al (52), les mouvements étaient répétés 4 fois lors d'un essai avec 2 cycles retenus par tâche (les 1ers et 4èmes cycles n'étaient pas retenus pour éviter les biais de début et fin de tâche). Pour définir le nombre de cycles de mouvement à réaliser par session, nous nous sommes basés sur l'article de Schwartz et al (62), référence pour évaluer tous les types de variabilité d'un protocole d'analyse 3D, qui propose 5 essais au sein d'une même session. Après étude des résultats de la première version, le biais de fin de tâche n'apparaissait pas comme un facteur limitant ou influençant les données, nous avons donc décidé de ne pas supprimer le dernier cycle de mouvement de chaque tâche dans cette étude.

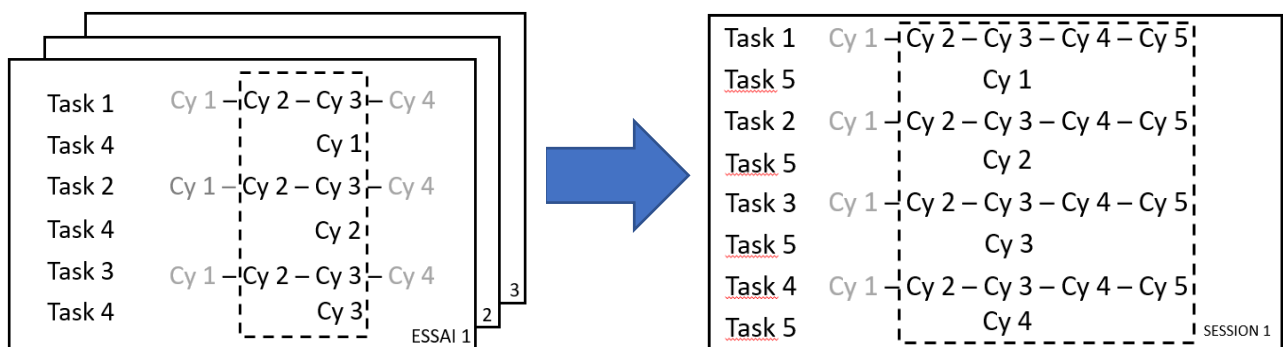


Figure 9 : Déroulement d'une session du protocole Be-API et sélection des cycles de mouvement (à gauche : V1.0 avec une session constituée de 3 essais ; à droite : V2.0)

Seul les cycles « aller » sont retenus pour l'analyse. A noter, dans la Tâche 3 « Tempête », le cycle commence à partir du moment où l'enfant saisit l'aimant et se termine lorsque l'aimant est posé sur le tableau de bord. Dans la Tâche 4 « Parachutiste », le cycle commence quand l'enfant attrape la manette et se termine quand il la repousse dans l'autre sens.

Au cours de ces tâches, les degrés de liberté d'intérêt explorés concernent le tronc (flexion, inclinaison, rotation), l'épaule (élévation, plan d'élévation, rotations -illustrés en *Figure 10-*), le coude (prono/supination, flexion/extension) et le poignet (flexion/extension, déviation ulnaire/radiale).

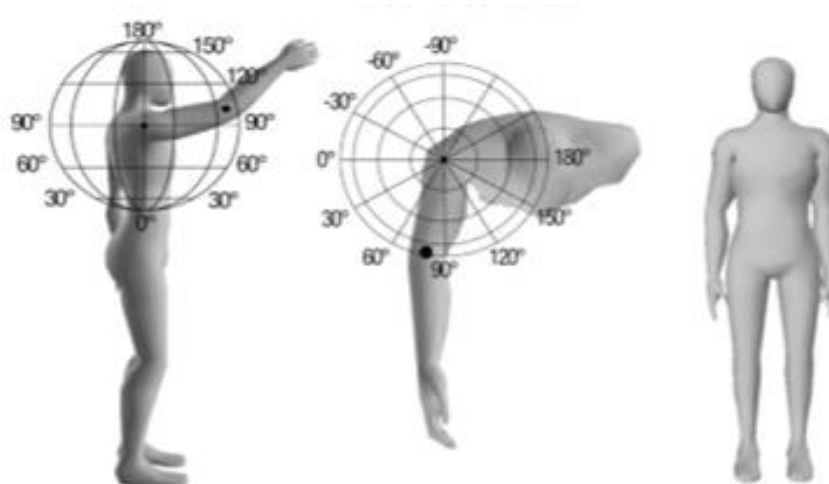


Figure 10 : Définition des degrés de liberté d'épaule d'après Gates et al., 2016. A : élévation d'épaule ; B : plan d'élévation d'épaule ; C : position neutre

Le tableau ci-dessous représente les degrés de liberté d'intérêt mobilisés lors de chaque tâche.

	Degré de liberté	TACHE 1 « Montagne »	TACHE 2 « Slalom »	TACHE 3 « Parachutiste »	TACHE 4 « Carburant »
EPAULE	Elévation		X		
	Plan d'élévation			X	
	Rotation Interne-Externe		X		
COUDE	Flexion-Extension	X			
	Prono-Supination				X
POIGNET	Flexion-Extension			X	
	Abduction-Adduction	X			

Tableau 1 : DDL d'intérêt du MS mobilisés lors de chaque tâche de la V1.0 du protocole (représenté par une croix) ; en gris : tâche supprimée de la V2.0.

	Degré de liberté	TACHE 1 « Montagne »	TACHE 2 « Slalom »	TACHE 3 « Parachutiste »	TACHE 4 « Carburant »	TACHE 1 « Montagne »
EPAULE	Elévation				X	
	Plan d'élévation				X	
	Rotation Interne-Externe		X			
COUDE	Flexion-Extension	X				
	Prono-Supination					X
POIGNET	Flexion-Extension			X		
	Abduction-Adduction	X				

Tableau 2 : DDL d'intérêt du MS mobilisés lors de chaque tâche de la V2.0 protocole (représenté par une croix) ; en bleu : nouvelles tâches en comparaison à la V1.0 .

La tâche « slalom » de la V1.0 n'a pas été modifiée, cependant, nous nous sommes concentrés sur l'exploration de la rotation interne/externe d'épaule en DDL d'intérêt unique. Une autre tâche « tempête » a été créée pour étudier plus spécifiquement l'élévation d'épaule.

Dans les tâches asymétriques (2, 3, 4 et 5), les enfants PCu ont réalisé les mouvements permettant l'exploration des DDL d'intérêt avec leur MS atteint et les enfants sains avec leur MS non-dominant.

Pour l'analyse des mouvements, la position et le déplacement des marqueurs visualisés sur un écran d'ordinateur permettaient ensuite de calculer les valeurs angulaires du tronc, des épaules, des coudes et des poignets, à l'aide du logiciel Matlab® (Mathworks®, Natick, US). Les courbes cinématiques et les paramètres cinématiques calculés (l'amplitude de mouvement (ROM) et la valeur angulaire maximale (MAX)) des DDL d'intérêt étaient étudiés. Les paramètres cinématiques sont représentés, pour chaque enfant, par la valeur moyenne calculée sur les 4 cycles de mouvement retenus pour chaque degré de liberté. Les paramètres ROM et MAX sont les critères d'évaluation principaux de cette étude.

3.5. Mesures cliniques

3.5.1. Evaluation médicale

L'âge, le sexe et la latéralité ont été recueillis chez les volontaires sains lors de la visite d'inclusion.

Chez les enfants PCu, les caractéristiques descriptives telles que l'âge, le sexe et le côté hémiparétique ont été collectés au moment des consultations médicales. Leur atteinte au membre supérieur a été classifiée selon des échelles cliniques d'évaluation de la fonction manuelle : MACS (27), BFMF (28) et MHC (29) (*Annexe 2*) :

- La MACS donne une valeur discrète (cotée de I à V), décrivant le niveau de manipulation, plus le score est élevé plus l'enfant est déficitaire.
- La BFMF donne une valeur discrète (cotée de I à V), décrivant le niveau de motricité fine et évaluant indépendamment les deux mains, plus le score est élevé plus l'enfant est déficitaire.
- La MHC donne une valeur discrète (cotée de 0 à 5), évaluant l'utilisation spontanée du membre supérieur ; plus le score est faible plus l'enfant est déficitaire.

La MHC et BFMF ont été ajoutées par rapport à la V1.0 afin d'avoir une idée plus précise de l'atteinte au MS des enfants. Elles sont complémentaires et toutes utilisées en routine, même si la MACS est la plus couramment décrite.

3.5.2. Bilan en kinésithérapie

Le bilan en kinésithérapie correspond à un examen clinique des membres supérieurs et ne concernent que les enfants atteints de PCu. Il comprend la mesure des amplitudes articulaires passive et active par goniométrie, la force musculaire selon la Medical Research Council (MRC) (63); la sélectivité motrice selon l'échelle contrôle moteur sélectif (CMS), la spasticité selon l'échelle d'Ashworth Modifiée (MAS) (64) (*Annexe 3*) la force de préhension et la pince pouce-index (grasp et pinch test) avec un dynamomètre, et la sensibilité (superficielle et profonde).

- La MRC donne une valeur discrète entre 0 et 5, où 5 est considéré comme une force normale.
- L'échelle de CMS donne une valeur discrète entre 0 et 2, où 2 est considéré comme un contrôle moteur normal.
- La MAS donnant une valeur discrète entre 0 et 4, où 0 est considéré comme l'absence d'hypertonie musculaire.
- La force de préhension (grasp test) est mesurée avec un dynamomètre pneumatique Baseline® à 30 psi (pound-force per square inch) et la force pince pouce-index (pinch test) par un dynamomètre Baseline® mécanique à 30 lbs (pound). Trois essais seront réalisés et la moyenne de ces essais sera conservée.
- La sensibilité superficielle (pic-touche ; chaud-froid) et profonde (sens de position des articulations et stéréognosie) ont été évaluée.

Ces évaluations sont réalisées du côté sain et du côté hémiparalysé.

3.5.3. Bilan en ergothérapie

L'évaluation de la performance bimanuelle a été effectuée par des ergothérapeutes certifiées avec un score validé : l'Assisting Hand Assessment (AHA) (30) et un questionnaire rempli par les parents de l'enfant : l'Abilhand-Kids (35).

L'AHA consiste en une session de jeu évaluant l'utilisation spontanée du membre supérieur au cours de tâches bimanuelles; l'enregistrement vidéo de la session de jeu est évalué par un professionnel certifié à travers 22 éléments. Chaque item étant coté de 1 à 4 (1= l'enfant ne fait pas ; 2= performance inefficace ; 3= performance partiellement efficace ; 4 = performance efficace). Les items évaluent l'utilisation générale (comment l'enfant initie le mouvement,

prend contact avec l'objet), l'utilisation du membre supérieur (comment l'enfant atteint l'objet, le stabilise par l'appui, bouge son bras ou son avant-bras), et l'attraper-relâcher (comment l'enfant attrape, maintient, stabilise par la préhension, réajuste la préhension). Elle donne une valeur quantitative continue (comprise entre 0 et 100 unités AHA), évaluant l'efficacité de l'utilisation de la main assistante dans les activités bimanuelles, où 100 unités AHA correspondent à une utilisation spontanée optimale de la main assistante.

L'Abilhand-kids est un questionnaire évaluant les performances manuelles au cours de 21 activités de la vie quotidienne, pour la plupart bimanuelles, notées par les parents en « facile », « difficile » ou « impossible ». Elle donne une variable quantitative continue (exprimée en % - logits), où un score élevé correspond à de bonnes performances manuelles quotidiennes.

L'ensemble de ces échelles et scores, utilisés en pratique courante dans le service de MPR Enfant, sont détaillés en *Annexe 2*.

3.6. Nombre de sujets nécessaires

Vingt enfants PCu seront inclus dans l'étude. Cet effectif a été défini pour des raisons pragmatiques de faisabilité. Il est en cohérence avec les analyses de même type publiées dans la littérature (41,47). Un tel effectif permet, pour des coefficients de Corrélations Intra-Classes (ICC) de 0.9, d'avoir des intervalles de confiance à 95% de 0.8 à 1.0 (65). La majorité des ICC calculés dans une étude de faisabilité que nous avons faite avec le même protocole est supérieure ou égale à 0.9.

Cette population sera comparée à vingt enfants sains avec un appariement sur l'âge, soit au total 40 participants.

3.7. Analyses statistiques

La population des enfants PCu et des enfants sains sera décrite en utilisant des effectifs pour les variables qualitatives et des moyennes, écart-types pour les variables quantitatives.

La reproductibilité intra et intersession des paramètres cinématiques sera évaluée via le calcul d'un coefficient de Corrélation Intra-Classe (ICC (2,k)). A partir de l'ICC, l'Erreur Standard de Mesure (SEM) pourra être calculée afin d'établir la différence minimale cliniquement pertinente. La reproductibilité intra et intersession des courbes angulaires sera calculée à l'aide

de la cartographie statistique paramétrique (*Statistical Parametric Mapping analysis* en anglais (SPM)).

Dans la V1.0, un Coefficient de Corrélation Multiple (CMC) a été utilisé pour étudier la reproductibilité inter-essais des courbes cinématiques et comparer celles des enfants PCu au corridor de normalité établi à partir des données des enfants sains. Dans la littérature, cette méthode était celle employée dans la majorité des études comparant des courbes cinématiques (53,66). La SPM est un excellent outil statistique qui a été initialement développé pour le traitement des données en neuro-imagerie. Elle a été récemment transposée au domaine de la biomécanique. Le premier article à utiliser le SPM dans l'analyse 3D du mouvement des membres supérieurs a été récemment publié par Simon-Martinez et al. sur des tâches unimanuelles (67).

On effectuera une comparaison entre la population PCu et contrôle aussi bien sur les courbes cinématiques que sur les paramètres cinématiques calculés. Les différences entre le corridor de normalité provenant des données obtenues chez les enfants sains, et les courbes cinématiques de chaque enfant PCu seront mesurées par la SPM. Les deux groupes seront comparés sur leurs paramètres cinématiques par un test *t* de Student si la distribution des scores suit une loi normale, ou un test de Wilcoxon dans le cas contraire.

On étudiera la corrélation entre les paramètres cinématiques et les mesures cliniques, utilisant un coefficient de corrélation de Pearson si la distribution des scores suit une loi normale, ou un coefficient de Spearman dans le cas contraire.

3.8. Eléments de faisabilité

3.8.1. Moyens humains

Marine Cacioppo, interne de MPR et étudiante en Master 2 « Activité physique adaptée santé », parcours APPCM, à la faculté STAPS, Université Rennes 2, de Septembre 2018 à Octobre 2019, était chargée de l'amélioration du protocole (nouvelles tâches, fabrication des objets du plateau de jeu et conception des éléments de décor), de la réalisation et organisation de l'étude (recherche de financement, appel à projets, rédaction du CPP et autres autorisations nécessaires, recrutement des patients en lien avec les médecins du service de MPRE du CHU de Rennes) ; avait le rôle d'expérimentatrice pour expliquer le jeu d'avion à chaque enfant et s'assurer de la bonne réalisation des tâches lors des acquisitions 3D ; et a réalisé l'interprétation des données en lien avec les scientifiques associés à l'étude (cf partie 3.8.2).

Antoine Marin, ingénieur de recherche au laboratoire M2S, a réalisé l'acquisition des données lors des analyses 3D, la labellisation sur Motive®, le traitement des données cinématiques sur Matlab® et a participé à l'interprétation des données.

Deux ergothérapeutes et deux kinésithérapeutes du service de MPRE, expérimentés dans l'évaluation du membre supérieur de l'enfant PCu, ont réalisé les bilans cliniques.

3.8.2. Organisation temporelle avec les étapes de réalisation

En 2017-2018 : participation à l'analyse et interprétation des résultats de la V1.0.

De Novembre 2017 à décembre 2018 : recherche de financement, rédaction d'appel à projets, recherche d'un promoteur, rédaction du CPP et demande d'autorisations

De Septembre 2018 à Janvier 2019 : amélioration de la V1.0, création des nouvelles tâches avec fabrication des objets du plateau de jeu et éléments de décor pour la V2.0.

De Février 2019 à Juin 2019 : inclusion des enfants PCu et sains dans la V2.0 du protocole.

De Février 2019 à Septembre 2019 : en parallèle des inclusions, labellisation sur Motive®, traitement des données sur Matlab® et interprétation des résultats.

3.9. Formalités réglementaires

Cette recherche a été qualifiée « Recherche non interventionnelle –catégorie 3 qui ne comportent aucun risque ni contrainte dans lesquelles tous les actes sont pratiqués et les produits utilisés de manière habituelle» sur la base du code de la santé publique et de l'arrêté du 12/04/18. A ce titre, le protocole de l'étude et un formulaire d'information et de non opposition à l'étude seront remis aux participants et à leurs parents. Le consentement oral d'au moins un des 2 parents et de l'enfant sera recueilli le jour de l'inclusion.

L'enregistrement et obtention d'un numéro IDRCB auprès de l'ANSM a été réalisé le 06/12/18.

Conformément à l'article L1121-4 du Code de la Santé Publique, le Comité de Protection des Personnes (CPP) OUEST II d'Angers a étudié ce projet de recherche et a émis un avis favorable à sa réalisation le 04/02/2019. Conformément à l'article L1121-4 alinéa 3, cet avis et la réalisation de la 1ère inclusion ont été transmis pour information au CPP et à l'ANSM respectivement le 13/02/19 et 25/02/19.

Cette étude entre dans le cadre de la « Méthodologie de Référence MR-003 » établi par la Commission Nationale Informatique et Liberté (CNIL).

Cette étude a été déclarée sur le site de Clinical Trial.

Ce projet de recherche est financé par la société IPSEN.

4. Résultats

L'étude est en cours de réalisation. Nous vous présenterons les résultats préliminaires sur 5 enfants PCu et 9 enfants sains.

4.1. Caractéristiques de la population

4.1.1. Enfants PCu

20 enfants PCu ont été recrutés, 15 garçons et 5 filles, âgés entre 6 et 16 ans (âge moyen 11,3 ans \pm 2.92). 9 enfants ont une hémiplégié droite et 11 une hémiplégié gauche, avec un niveau MACS réparti comme suit : MACS I (7), II (8), III (5). Parmi eux, 9 enfants ont déjà participé à la V1.0 BE-API.

Les 5 premiers patients inclus dans l'étude, dont nous vous donnerons quelques résultats dans ce mémoire, sont présentés plus en détails ci-dessous avec les résultats des scores évaluant la performance bimanuelle (AHA et Abilhand-Kids).

Patient	Age	Sexe	Côté hémiplégié	MACS	MHC	BFMF	AHA Score total en unit-AHA (Score pondéré en %)	Abilhand-Kids en %-logits
1	15	M	droit	3	3	Ila	53 (47)	68
2	13	F	gauche	1	5	I	69 (71)	83
3	10	M	droit	1	5	I	82 (91)	88
4	13	M	droit	3	2	Ila	37 (23)	69
5	8	M	gauche	2	3	Ila	55 (50)	57

Tableau 3 : Caractéristiques et scores cliniques des 5 premiers enfants PCu inclus

Le score moyen des AHA est de 59.2 (SD \pm 17.1) unit-AHA contre 62.9 (SD \pm 11.27) unit-AHA dans la V1.0.

Le score moyen des Abilhand-Kids est de 73%-logits (SD \pm 12.5) contre 71.8 % logits (SD \pm 12.7) dans la V1.0.

4.1.2. Enfants sains

20 enfants sains ont été recrutés pour être comparés aux enfants PCu, 5 garçons et 15 filles, 18 droitiers et 2 gauchers. Ils ont été appariés sur l'âge civil à +/- 1 an (âge moyen 10.9 ± 3.0 ans).

4.2. Comparaison entre BE-API V1.0 et V2.0 (tâches communes)

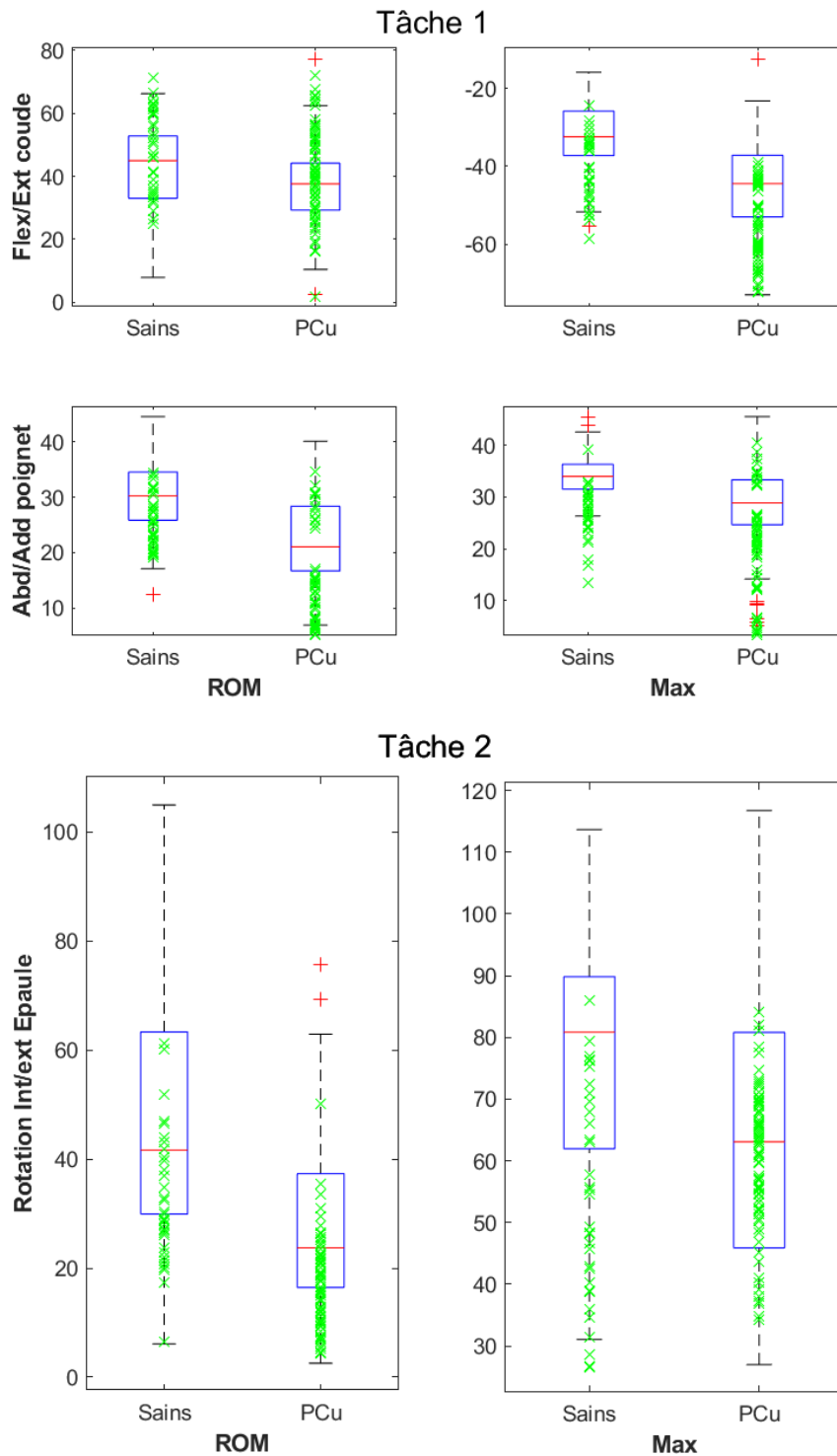
Les tâches communes aux 2 versions du protocole BE-API sont les Tâches 1 « Montagnes », 2 « Slaloms » et 5 « Carburant ». Leurs résultats préliminaires sur les MAX et ROM des DDL d'intérêt vous sont présentés ci-dessous (*Tableau 4* et *Figure 10*).

	Tâche 1 « montagne »				Tâche 2 « slalom »				Tâche 5 « carburant »			
	DDL	Angles V1 (en °)	Angles V2 (en °)	p	DDL	Angles V1 (en °)	Angles V2 (en °)	p	DDL	Angles V1 (en °)	Angles V2 (en °)	p
ROM	FE coude	42.1 [12.8]	47.3 [12.5]	.02	Rot épaule	47.8 [21.8]	32.1 [12.5]	<0.01	PS	102.0 [10.6]	122.3 [17.6]	<0.01
MAX	Ext coude	-32.5 [6.7]	-39.8 [8.9]	<0.01	RE épaule	77.6 [19.7]	53.0 [18.5]	<0.01	Sup	63.8 [6.0]	75.1 [15.7]	<0.01
ROM	AA poigne t	29.9 [5.5]	25.9 [5.9]	<0.01								
MAX	Add poigne t	34.1 [3.2]	26.8 [4.6]	<0.01								

Tableau 4 : Paramètres cinématiques (MAX et ROM) de chaque tâche exprimés par la valeur angulaire moyenne avec déviation standard (DS) pour chaque DDL d'intérêt chez les enfants sains. FE : Flexion-Extension ; Ext : Extension ; AA : Abduction-Adduction ; Add : Adduction ; Rot : Rotation ; RE : Rotation Externe ; PS : Pronosupination ; Sup : Supination

Comme le montre le *Tableau 4*, il existe une différence significative entre les valeurs de ROM et MAX des 2 versions du protocole BE-API sur tous les DDL d'intérêt ($p < 0.02$).

a *Figure 10* illustre la répartition des valeurs des paramètres ROM & MAX de la V2.0, sur les 4 cycles de mouvement des enfants sains (1 session) et 8 cycles de mouvement des enfants PCu (2 sessions), comparativement aux anciennes valeurs retrouvées sur la V1.0.



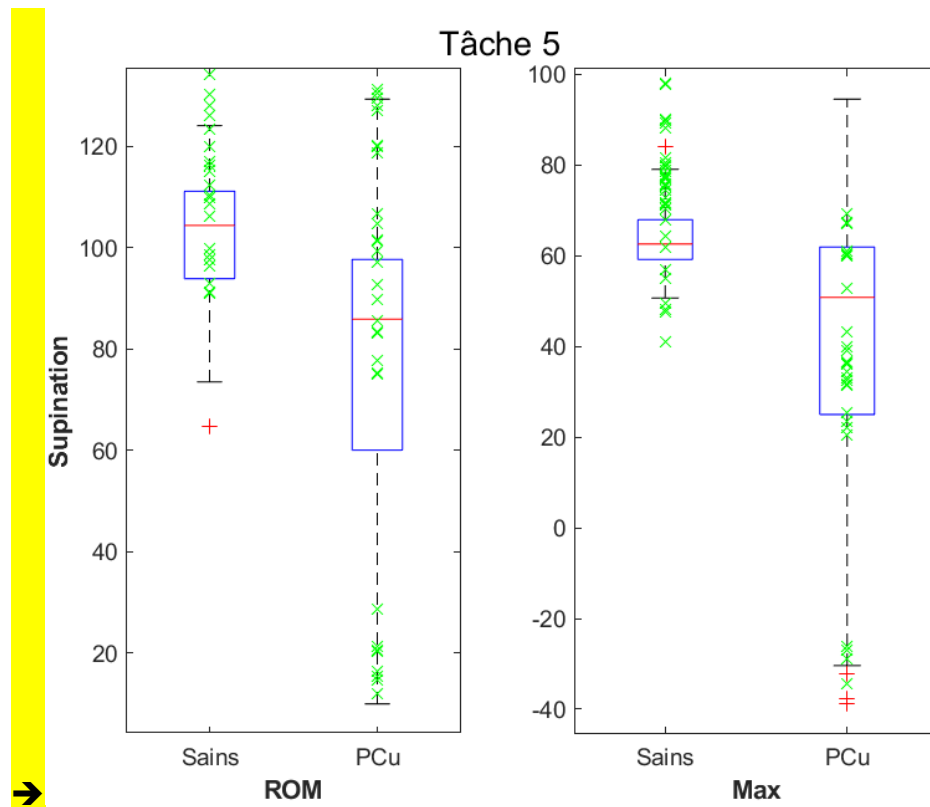


Figure 11: Comparaison des paramètres cinématiques (MAX & ROM) des Tâches 1, 2 et 5 entre la V1.0 (boites à moustache) et la V2.0 (croix vertes) sur les DDL d'intérêt de chaque tâche pour les enfants PCu et sains. Les croix rouges représentent les valeurs extrêmes considérées comme des « outlayers ».

Les valeurs de ROM & MAX de cette nouvelle version, chez les enfants PCu et sains, sont très majoritairement situées dans l'étendue de la distribution de la V1.0.

Dans la Tâche 1, on observe un certain nombre MAX d'adduction de la V2.0 inférieures à la distribution des MAX de la V1.0, surtout chez les enfants sains. Dans la Tâche 5, quelques ROM & MAX de supination de la V2.0 sont supérieurs à la distribution des MAX de la V1.0 chez les enfants sains.

Les résultats des Figures 10, 11, 12 sont en accord avec ceux de la V1.0, avec globalement une diminution du MAX d'extension de coude et du ROM & MAX d'adduction de poignet (Tâche 1), ROM & MAX de rotation interne d'épaule (Tâche 2) et du ROM & MAX de supination (Tâche 3) chez les enfants atteints de PCu comparativement aux enfants sains.

4.3. Résultats des nouvelles tâches de la V2.0

Les résultats des nouvelles Tâches 3 « Tempête » et 4 « Parachutistes » concernant les paramètres cinématiques (Figure 11) et les courbes angulaires (Figures 12 et 13) vous sont présentés ci-dessous. Nous nous sommes intéressés aux résultats des enfants sains car ils constituent notre population de référence pour les valeurs angulaires.

4.3.1. Paramètres cinématiques des enfants sains sur les Tâches 3 et 4

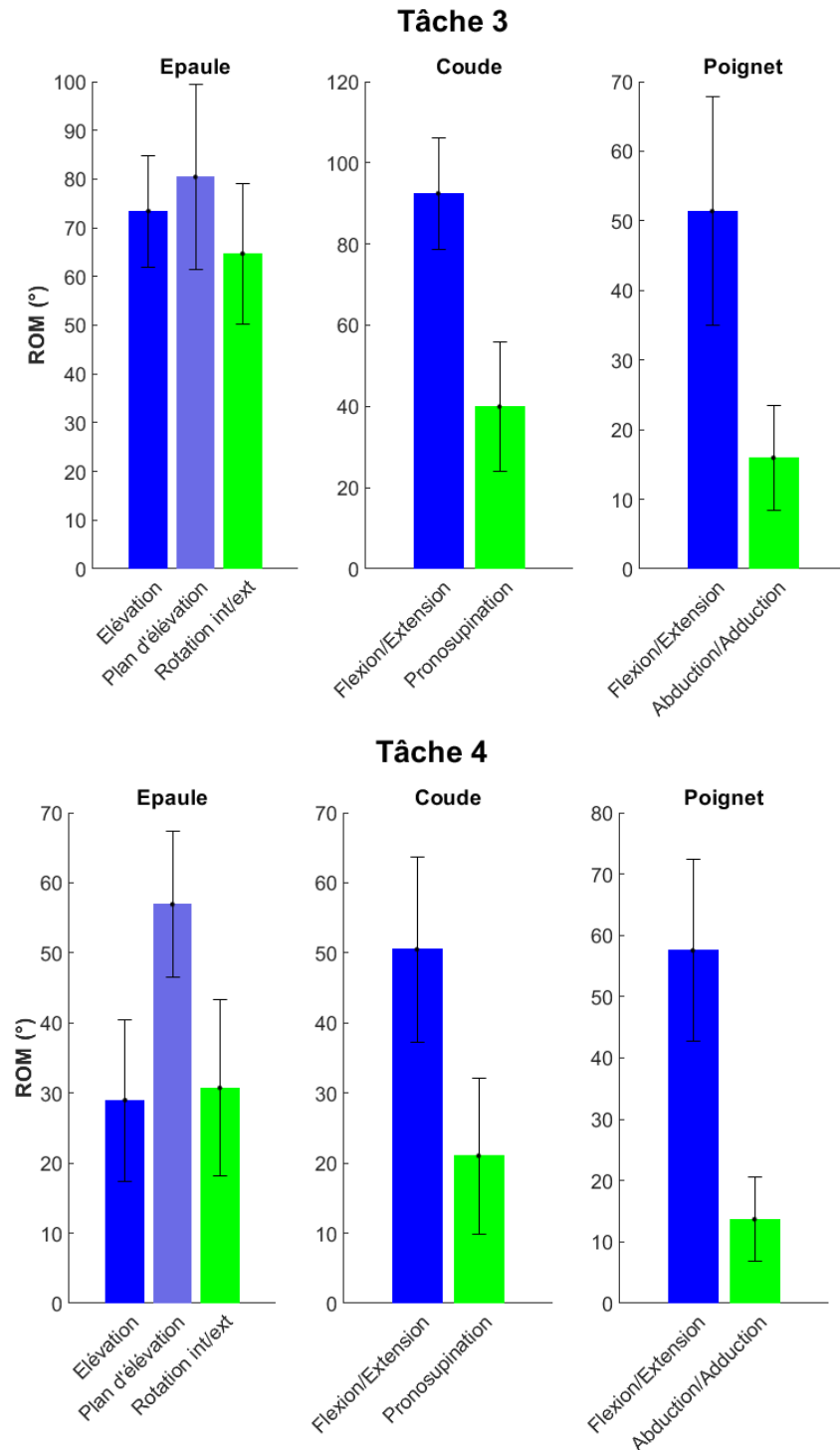


Figure 12 : Histogrammes représentant les ROM moyens (en degré) pour tous les DDL explorés au MS dans les Tâches 3 et 4 chez les enfants sains

Dans la Tâche 3, les DDL d'épaule sont largement mobilisés, surtout le plan d'élévation à $80.43^\circ (\pm 18.92)$ et l'élévation à $73.43^\circ (\pm 11.42)$ en moyenne. La flexion-extension de poignet à $51.38^\circ (\pm 16.39)$ et de coude $92.46 (\pm 13.73)$ en moyenne sont aussi plus sollicités que les autres DDL du MS chez les enfants sains.

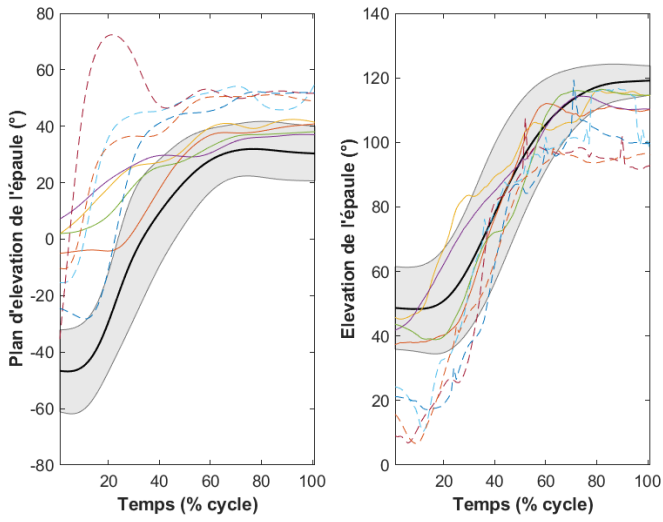
Dans la Tâche 4, le plan d'élévation d'épaule à $56.9^\circ (\pm 10.5)$, la flexion de coude à $50.5^\circ (\pm 13.2)$ et l'extension de poignet à $57.5^\circ (\pm 14.8)$ en moyenne sont plus sollicités que les autres DDL du MS chez les enfants sains.

Tous les DDL du MS interviennent dans la réalisation des Tâches 3 et 4.

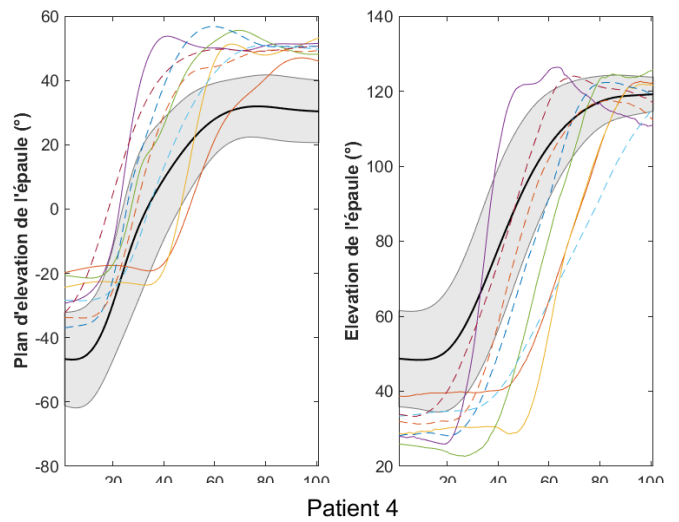
4.3.2. Courbes cinématiques des enfants sains sur les Tâches 3 et 4

Tâche 3

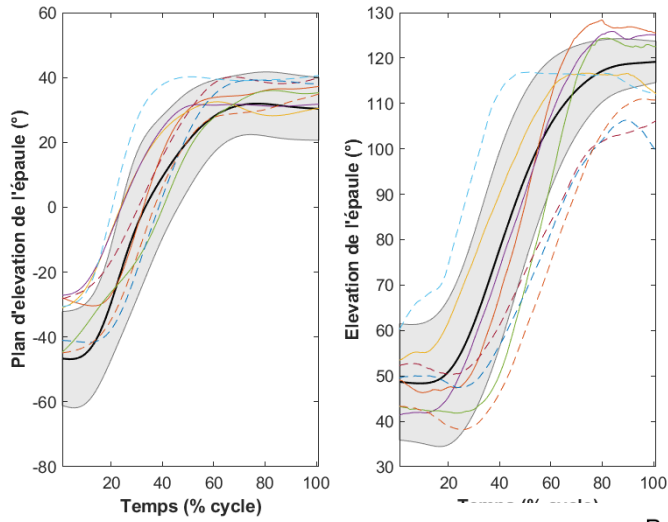
Patient 1



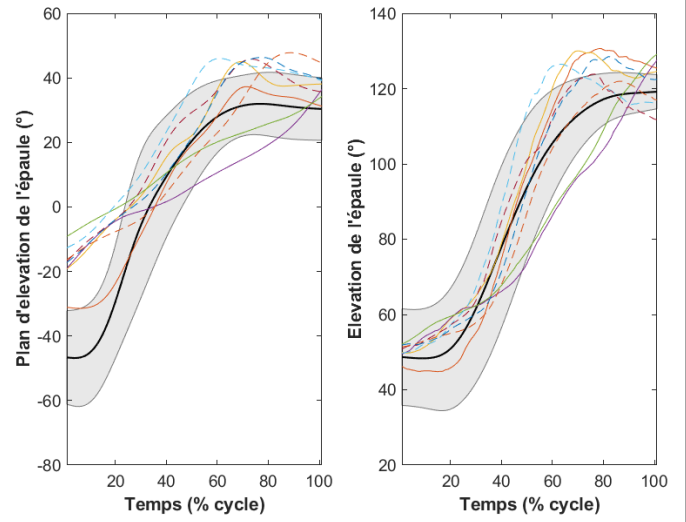
Patient 2



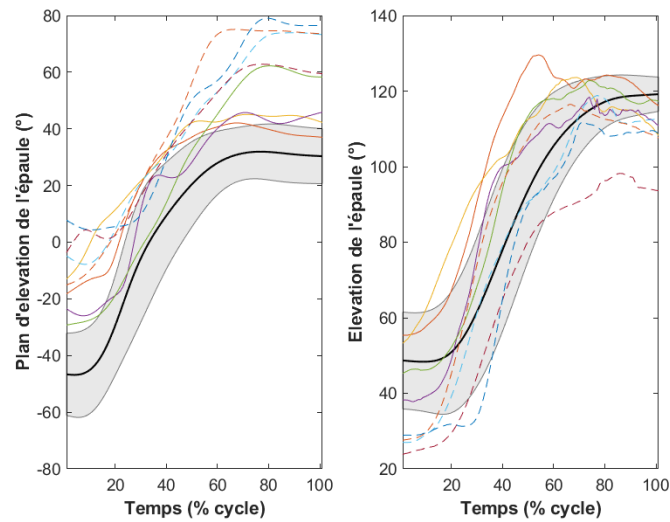
Patient 3



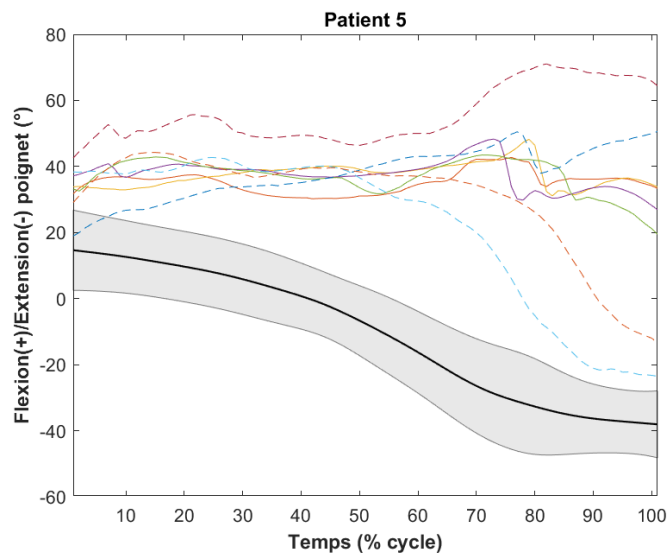
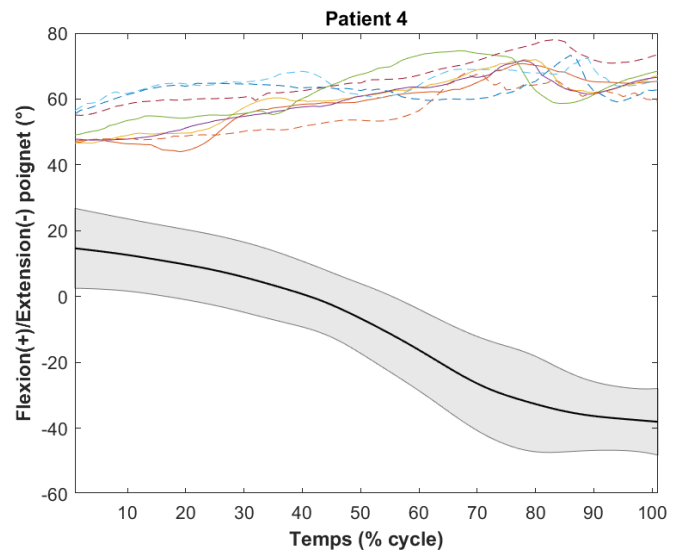
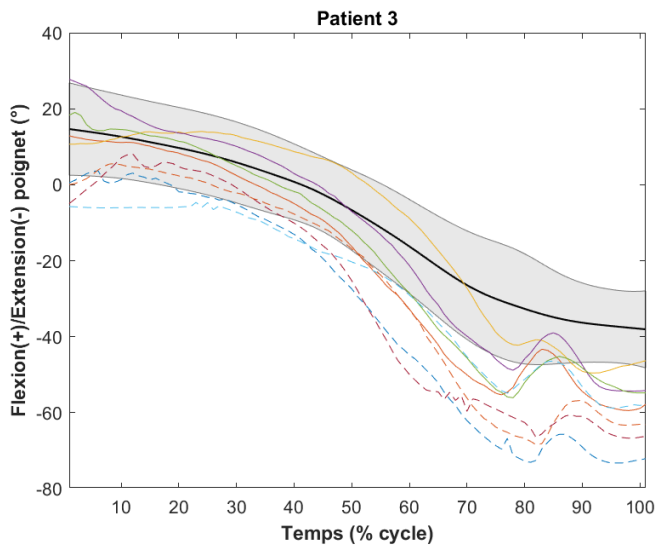
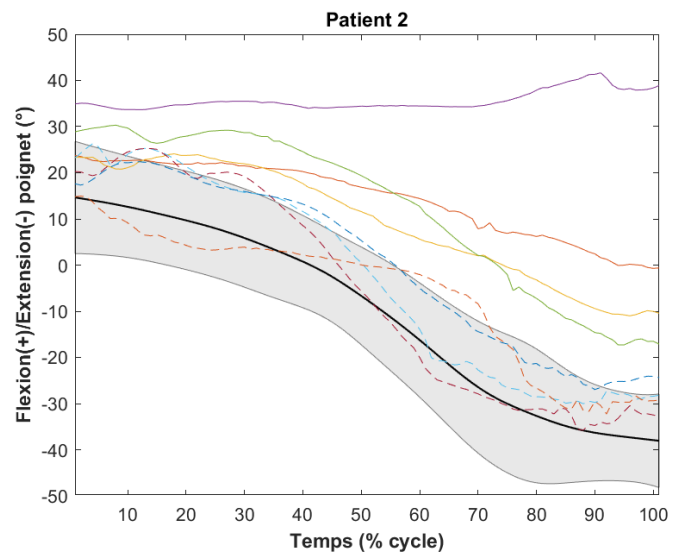
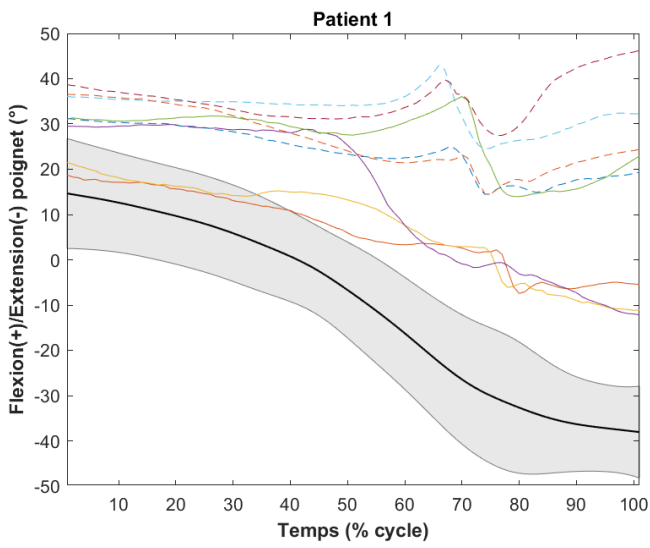
Patient 4



Patient 5



Tâche 4



Figures 13 et 14 : Courbes cinématiques des DDL d'intérêt des tâches 3 (flexion-extension de poignet) et 4 (élévation et abduction d'épaule) des 2 sessions de chaque enfant PCu inclus, rapportées au corridor de normalité établi à partir des 9 enfants sains inclus.

Concernant la Tâche 3, on observe des courbes assez proches du corridor de normalité avec quelques variations notables. Les courbes sont bien reproductibles d'un cycle à l'autre sur l'élévation et le plan d'élévation d'épaule chez les enfants PCu.

- Elévation d'épaule : Les patients 4 a des courbes très proches du corridor de normalité. Chez les patients 1 et 5, il existe un défaut d'abduction initial et final comparativement aux enfants sains. Les patient 1, 2 et 5 ont une élévation rapide sur 40% du cycle en moyenne contre une élévation plus progressive réalisée entre 20 et 80% du cycle pour les autres patients (3 et 4) et les enfants sains. Le patient 1 a une trajectoire de mouvement moins lisse avec plus d'à-coups tout au long du cycle et les patients 4 et 5 aussi surtout en fin de cycle.

- Plan d'élévation : Les patients 3 a toutes ses courbes très proches du corridor de normalité. Le plan d'élévation est augmenté surtout en début et fin de tâche pour les patients 2 et 5, et tout au long du cycle pour le patient 1. Les patients 1 et 4 ont moins d'amplitude de plan d'élévation, variant en moyenne entre 40 et 60°. Les profils de courbe des enfants 2, 3 et 5 semblent relativement similaires. Les patient 1 et 5 ont une trajectoire de mouvement moins lisse avec plus d'à-coups tout au long du cycle.

Concernant la Tâche 4, on observe une différence marquée entre le mouvement réalisé par les enfants sains (corridor de normalité passant de 20° de flexion à 30° d'extension de poignet) et celui des 5 enfants PCu. Les courbes sont moins reproductibles que la Tâche 3, sauf pour les patients 3 et 4. Les courbes cinématiques des patients 2 et 3 (MACS I) se rapprochent le plus du corridor de normalité tout au long du cycle. Ce sont les seuls enfants à avoir de l'extension de poignet (jusqu'à -70° pour le patient 3). Les patients 1, 4 et 5 reste en flexion de poignet, surtout le patient 4 qui reste fixé autour de 60° tout au long du cycle. Les patients 1,2 et 5 semblent avoir un profil de courbes cinématiques similaire sur la flexion-extension de poignet lors de la tâche 4. Les patients 3 et 4 ont des cycles très reproductibles pendant toute la tâche. On observe plus de variations en fin de cycle pour les enfants 1,2 et 3.

5. Discussion

Les résultats sur les 14 premiers participants de l'étude sont encourageants et démontrent l'intérêt de la nouvelle version, Be-API V2.0. Celle-ci répond aux principaux facteurs limitants mis en évidence dans la V1.0 du protocole d'analyse 3D.

Notre échantillon d'étude était représentatif des enfants PCu que nous pouvons rencontrer dans la population générale. En effet, tous les âges étaient représentés, avec un appariement permettant d'étudier les profils de développement moteur du MS non dominant entre les enfants sains et PCu. Nous avons apporté une distribution plus homogène des niveaux de MACS par rapport à la V1.0, en accord avec celle retrouvée sur de plus grande cohorte dans la littérature (27). La répartition garçons/filles était également respectée par rapport aux données épidémiologiques connues (1).

En intégrant un scénario de « jeu d'avion et l'utilisation de nouvelles technologies, une bonne adhésion au protocole a été trouvée chez tous les enfants. Autant de filles que de garçons ont souhaités participer. L'environnement ludique a permis de s'éloigner du contexte très standardisé et formel d'évaluation afin de favoriser ainsi une spontanéité de mouvement. Ainsi, il a été possible d'explorer l'ensemble des DDL du MS connus pour être limités chez les enfants PCu (42,43,44), en situation bimanuelle. Nous avons observé une bonne faisabilité des tâches du protocole 3D.

La conception de BE-API V2.0 avec la conservation des anciennes Tâches 1, 2 et 5 semblait être adaptée. Ces tâches avaient démontrées une excellente reproductibilité inter-essais et permettaient de mettre en évidence une différence significative sur l'extension de coude, l'adduction de poignet, la rotation interne d'épaule et la supination entre les enfants PCu et sains, comme en témoigne la *Figure 11*.

Cependant, la Tâche 2 « slalom » était limitante dans la V1.0. Un enfant MACS III (sur 2 enfants MACS III inclus) n'avait pas été capable de réaliser cette tâche. Les raisons évoquées étaient son jeune âge responsable d'une forte distractibilité et la préhension prolongée du volant associée à des mouvements de rotation interne d'épaule et supination. En effet, une rotation du volant de 180° était demandé à tous les participants. Dans cette nouvelle version, il n'a pas été trouvé de solutions pour améliorer la prise sur le volant malgré des essais de manche grossit ou des réflexions sur la création d'une aide technique sur maintenir le poignet quand la main est sur volant (pouvant permettre la réalisation du mouvement complet au détriment d'autres DDL

contraints, au niveau du poignet notamment). Il nous a cependant semblé intéressant de conserver cette tâche car elle n'avait été réalisée que par 2 enfants très déficitaires (MACS III) lors de la V1.0, ce qui n'était pas forcément représentatif de tous les enfants MACS III, et elle avait tout de même démontrés des différences significatives sur la rotation interne et l'extension de poignet en comparaison des enfants sains.

Dans les résultats préliminaires de l'étude actuelle, 2 enfants MACS III ont réalisé la Tâche 2. Le mouvement de rotation du volant à 180° n'a malheureusement pas été entièrement réalisable par ces enfants. Ils faisaient un mouvement de rotation du volant de plus faible amplitude est réalisé ou alors lâchaient et propulsaient le volant pour qu'il finisse sa rotation, surtout vers le bas. Ceci est expliqué par les limitations d'amplitude souvent retrouvées chez ces enfants, en rotation interne d'épaule et supination (44,46,60). Les consignes données à ces enfants ont été modifiées en per-protocole, en leur demandant de toujours garder la prise du volant avec la main déficitaire pour tourner le volant, sans nécessairement que les 180° de rotation du volant soient atteints. De cette façon, les enfants MACS III ont été capables de réaliser la tâche. Cependant, nous ne pouvons pas conclure avec seulement 2 enfants MACS III qui ont réalisés le protocole sur les 6 recrutés. Il sera aussi intéressant de voir si cette tâche devient entièrement réalisable (rotation du volant de 180°) après traitement par injection de toxines botuliniques, ce qui témoignerait d'une bonne sensibilité au changement de cet outil.

Il existe une différence significative entre les données moyennes de MAX & ROM des enfants sains des 2 versions du protocole (*Tableau 4*). Elle peut s'expliquer par le faible effectif présenté dans ce mémoire induisant un manque de puissance statistique. Cette comparaison a été réalisée sur seulement 9 enfants dans la V2.0 contre 20 enfants dans la V1.0, soit 36 cycles de mouvement comparés à 120 cycles. Néanmoins, nous avons montré que les valeurs des paramètres cinématiques des patients de la V2.0 avaient la même distribution que la V1.0 (*Figure 11*), ce qui est encourageant pour affirmer que ces tâches sont bien reproductibles dans les 2 versions du protocole 3D.

Une autre explication possible à ces résultats est le changement d'expérimentateur et de matériel d'enregistrement (Optitrack sur la V1.0) pouvant constituer un biais par la variabilité extrinsèque qu'ils induisent. Mais, à ce stade d'avancement de l'étude, il n'est pas possible de conclure et il faudra attendre les résultats sur les 20 enfants sains.

Sur la *Figure 11*, certains MAX & ROM diffèrent légèrement de la distribution de la V1.0 sur les DDL distaux. Cette variation peut être expliquée par un léger changement de position des marqueurs au niveau du poignet en raison des expérimentateurs différents entre les 2 protocoles.

Ces variations semblent néanmoins plus marquées chez les enfants sains que les enfants PCu, ce qui rend cette hypothèse peu probable.

Ces anciennes tâches semblent toujours reproductibles et discriminantes dans cette nouvelle version, ce qui nous conforte dans l'idée qu'il était intéressant de les conserver dans la V2.0.

Avec la création des nouvelles Tâches 3 et 4, la V2.0 permet l'exploration plus spécifique des DDL d'épaule et de poignet, qui n'étaient pas assez sollicités dans la V1.0. Elles viennent ainsi compléter l'évaluation globale du MS en situation bimanuelle.

Avec l'étude des paramètres cinématiques (ROM & MAX) des enfants sains, nous avons démontré que les DDL d'intérêt que nous voulions explorer plus spécifiquement à travers la création de ces tâches, étaient largement mobilisés. Il s'agit respectivement du plan d'élévation et l'élévation d'épaule pour la Tâche 3 et de l'extension de poignet pour la Tâche 4. Il sera intéressant de comparer ces valeurs calculées chez les enfants sains aux enfants PCu afin de voir si ces DDL sont sollicités de la même façon et dans les mêmes amplitudes dans cette population.

D'autres amplitudes apparaissent également fortement mobilisés dans ces tâches, témoignant de la synergie entre les différentes articulations qui se coordonnent pour aboutir à un mouvement (68). Leur étude pourrait nous permettre d'identifier des anomalies primaires (syncinésies, co-contractions) et/ou des mouvements compensatoires si une différence était mise en évidence entre les 2 populations (18).

La Tâche 3 permet aussi d'explorer d'autres éléments non explorés dans la V1.0 comme la fluidité du mouvement et les différentes étapes de préhension d'un objet (attraper, saisir, soulever, transporter, poser). Ces mouvements ont déjà été étudiés en analyse 3D dans des protocoles unimanuels (44,54) et pourront ainsi y être comparés. On observe sur la Tâche 4 que les enfants MACS III ont plus de difficultés à se stabiliser en fin de cycle, lors de l'élévation maximale fonctionnelle, ce qui peut également être interprété comme un défaut de précision et de contrôle moteur pour placer l'aimant sur le tableau de bord.

La reproductibilité est un élément essentiel de ce protocole à évaluer. Il a été conçu de façon à ce que les enfants puissent réaliser des mouvements spontanés mais toujours avec la même stratégie motrice pour arriver à la finalité de la tâche. Cette condition témoigne de la difficulté de conception d'un tel protocole pour constituer un bon outil d'évaluation. Les tâches 1,2 et 5 avaient démontrés une excellente reproductibilité sur les courbes cinématiques et les

paramètres cinématiques (ROM & MAX). Sur les premières données de cette étude, il est intéressant de voir qu'une bonne reproductibilité semble exister entre les courbes cinématiques des 2 sessions réalisées en inter-jour par les enfants PCu, surtout sur la Tâche 3. A ce stade de l'analyse, on peut simplement dire que les enfants MACS III semblent avoir moins de fluidité dans leur trajectoire de mouvement et sont de fait moins reproductibles que les autres. La reproductibilité devra être évaluée statistiquement et sur l'ensemble des paramètres cinématiques.

Les courbes cinématiques des enfants PCu sur le corridor de normalité (*Figures 13 et 14*) permettent de montrer que ces nouvelles tâches sont assez discriminantes pour reconnaître un enfant déficitaire d'un enfant sain, surtout la Tâche 4. Nous pouvons dire avec ces premiers résultats qu'il existe une tendance à une élévation d'épaule et extension de poignet diminuées. Le plan d'élévation d'épaule est en revanche plutôt augmenté, contrairement aux données de la littérature dans des tâches de pointage ou des tâches où il devait attraper un objet où il est diminuée (44,54). Il s'agit probablement d'un effet compensatoire pour réaliser le mouvement global du MS.

Il sera intéressant d'explorer plus en détails les courbes cinématiques, à l'aide d'outil statistique comme la SPM comme l'ont fait récemment Cristina Simon-Martinez et al. (67). Les courbes et les paramètres cinématiques (ROM et MAX) pourront être étudiés en fonction du niveau MACS, de l'AHA, de l'Abilhand Kids et de l'âge pour mettre en évidence des profils de stratégie motrice. Nous pouvons trouver dans la littérature des auteurs comme Mailleux et al qui ont corrélés des scores cliniques à la cinématique (57).

Le développement de nouveaux paramètres spatiotemporels pour comprendre et décrire plus précisément les anomalies du mouvement des MS telles que les syncinésies, les co-contractions, les déséquilibres de force agoniste-antagoniste et les compensations, est en cours. Nous voulons avec l'ensemble des paramètres extraits grâce à l'analyse 3D créer un index cinématique comme ceux développés par les équipes de Jaspers et Butler (51,55). Par cette évaluation globale multi-paramétrique, nous espérons avoir une meilleure corrélation aux scores cliniques validés que dans la V1.0, où ces derniers étaient faiblement à modérément corrélés aux paramètres cinématiques (ROM & MAX).

Sur le plan méthodologique, certaines limites peuvent être discutées. Notamment, l'évaluation de la reproductibilité sur 2 sessions qui reste critiquable. Comme l'ont montré certains auteurs

(62), la comparaison des paramètres cinématiques sur 3 sessions a plus de valeur. Mais pour une raison de faisabilité de l'étude, ce schéma n'a pas été mis en place pour évaluer la reproductibilité de ce protocole. Il reste néanmoins important de souligner que le nombre de cycle de mouvement à comparer a été augmenté (6 cycles en intra-session contre 8 cycles en inter-jour) afin d'augmenter la puissance de cette évaluation.

La standardisation des nouveaux éléments du plateau de jeu, fabriqués pour les besoins de l'étude, sera à prévoir pour son déploiement en tant qu'outil d'évaluation des enfants atteints de PCu dans d'autres services de MPR

En perspective, la validation de cette nouvelle version doit être poursuivie afin de démontrer l'intérêt des changements apportés à la V1.0 et passera ensuite par l'étude de :

1. la reproductibilité inter-jour des paramètres cinématiques (MAX et ROM) et courbes angulaires chez tous les participants,
2. la comparaison des courbes et paramètres cinématiques entre les enfants PCu et sains,
3. la corrélation des paramètres cinématiques avec les scores cliniques (MACS, MHC, BFMF) et échelles d'évaluation de la performance bimanuelle (AHA et Abilhand Kids).
4. L'étude de la sensibilité au changement (avant et après injections de toxine botulinique dans le traitement local de la spasticité)

Conclusion

Le protocole BE-API est un outil innovant et ludique permettant d'évaluer précisément et objectivement les anomalies du mouvement des MS chez les enfants atteints de PCu, en situation bimanuelle. En répondant aux facteurs limitants identifiés dans la première version, cette nouvelle version semble prometteuse pour permettre une meilleure évaluation fonctionnelle des MS chez ces enfants. La validation de BE-API V2.0 est nécessaire afin d'être utilisé en tant qu'outil d'évaluation diagnostique et clinique, dans le but d'adapter individuellement les traitements à chaque enfant atteint de PCu.

Bibliographie

1. Dossier de presse La Fondation paralysie Cérébrale VF (2017). www.fondationparalysiecerebrale.org
2. Rosenbaum, P., Paneth, N., Leviton, A., Goldstein, M., Bax, M., Damiano, D., & al. (2006). A report: the definition and classification of cerebral palsy, *Dev Med Child Neurol Suppl*, 109:8–14.
3. Himmelmann, K & Uvebrant, P, (2017). The panorama of cerebral palsy in Sweden part XII shows that patterns changed in the birth years 2007–2010, *Acta Paediatrica*, 107, 3, 462-468
4. Sellier E, Platt MJ, Andersen GL, Kreageloh-Mann I, De La Cruz J, Cans C, & al. (2016). Decreasing prevalence in cerebral palsy: a multi-site European population-based study, 1980 to 2003. *Dev Med Child Neurol*, 58: 85–92.
5. Reid SM, Meehan E, McIntyre S, Goldsmith S, Badawi N, Reddihough DS, & al. (2016) Temporal trends in cerebral palsy by impairment severity and birth gestation. *Dev Med Child Neurol*, 58(Suppl 2): 25–35.
6. Touyama M, Touyama J, Toyokawa S & Kobayashi Y. (2016). Trends in the prevalence of cerebral palsy in children born between 1988 and 2007 in Okinawa, Japan. *Brain Dev*, 38:792–9.
7. Durkin MS, Benedict RE, Christensen D, Dubois LA, Fitzgerald RT, Kirby RS, & al. (2016). Prevalence of cerebral palsy among 8-year-old children in 2010 and preliminary evidence of trends in its relationship to low birthweight. *Paediatr Perinat Epidemiol*, 30: 496–510.
8. Bérard C., (2010). *La paralysie cérébrale de l'enfant : Guide de la consultation, examen neuro-orthopédique du tronc et des membres inférieurs*. (2e Ed., p263) Montpellier: Sauramps Médical.
9. Broström L, Vollmer B, Bolk J, Eklöf E, Ådén U, (2018) Minor neurological dysfunction and associations with motor function, general cognitive abilities, and behaviour in children born extremely preterm, *Developmental Medicine & Child Neurology*, **60**, 8, (826-832).
10. Ashwal S, Russman BS, Blasco PA, Miller G, Sandler A, Shevell M, Stevenson R (2004) Practice parameter: diagnostic assessment of the child with cerebral palsy: report of the Quality Standards Subcommittee of the American Academy of Neurology and the Practice Committee of the Child Neurology Society. *Neurology*; 23;62(6):851-63.
11. Christine C, Dolk H, Platt MJ, Colver A, Prasauskiene A, Krägeloh-Mann I, SCPE Collaborative Group (2007). Recommendations from the SCPE collaborative group for defining and classifying cerebral palsy, *Developmental Medicine & Child Neurology*, 109:35-8.
12. Himmelmann K, Horber V, De La Cruz J, Horridge K, Mejaski-Bosnjak V, Hollody K, Krägeloh-Mann I (2017). MRI classification system (MRICS) for children with cerebral palsy: development, reliability, and recommendations. *Dev Med Child Neurol*, 2017, 59: 57-64.
13. Colver AF, Sethumadhavan T (2003). The term diplegia should be abandoned. *Arch Dis Child*. 2003;88(4):286-90.
14. SCPE Collaborative Group (2000). Surveillance of cerebral palsy in Europe: a collaboration of cerebral palsy surveys and registers. *Developmental Medicine and Child Neurology*. 42:816-24.

15. Gorter JW, Rosenbaum PL, Hanna SE, Palisano RJ, Bartlett DJ, Russell DJ, et al. Limb distribution, motor impairment, and functional classification of cerebral palsy. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 2007;46(7):461-7.
16. Gracies J, Pathophysiology of spastic paresis. I: Paresis and soft tissue changes. *Muscle Nerve*, 2005;31: 535-551.
17. Gordon AM, Duff SV. Relation between clinical measures and fine manipulative control in children with hemiplegic cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol*. 1999 sept;41(9):586-91.
18. Steenbergen B, Gordon AM. Activity limitation in hemiplegic cerebral palsy: evidence for disorders in motor planning. *Dev Med Child Neurol*. sept 2006;48(9):780-3.
19. Bard R., Chaleat-Valayer E, Coiffier-Leone C, Combey A, D'anjou MC, De Lattre C, Descotes A, Doucet C, Faron M, Jacquemot D, Krummenacker C, Pupat EL, Molia C, Mugnier C, Redoux J, Turcant F, Prise en charge non chirurgicale du membre supérieur spastique de l'enfant hémiplégique, Pratique professionnelle, travail groupe R4P, 2015 juin
20. Novak I, McIntyre S, Morgan C, Campbell L, Dark L, Morton N, Stumbles E, Wilson SA, Goldsmith S. A systematic review of interventions for children with cerebral palsy: state of the evidence. *Dev Med Child Neurol*. 2013 Oct;55(10):885-910.
21. Traitements médicamenteux de la spasticité : Recommandations de bonnes pratiques. Juin 2009.
22. Classification internationale du fonctionnement, du handicap et de la santé, Organisation mondiale de la santé, Genève, Tech. Rep., 2001.
23. Taub E, Uswatte G, Mark VW, Morris DMM. The learned nonuse phenomenon: implications for rehabilitation. *Eur Medicophysica*. 2006 Sep;42(3):241–56.
24. Arner M, Eliasson A-C, Nicklasson S, Sommerstein K, Hägglund G. Hand function in cerebral palsy. Report of 367 children in a population-based longitudinal health care program. *J Hand Surg*. 2008 Oct;33(8):1337–47.
25. Greaves S, Imms C, Dodd K., Krumlinde-Sundholm L., Assessing bimanual performance in young children with hemiplegic cerebral palsy: a systematic review, *Developmental Medicine & Child Neurology*. 2010 ; 52 (5), 413-421 2010
26. Fermanian J, Validation of assessment scales in physical medicine and rehabilitation: how are psychometric properties determined? *Ann Readapt Med Phys*. 2005 Jul;48(6):281-7.
27. Eliasson A-C, Krumlinde-Sundholm L, Rösblad B, Beckung E, Arner M, Öhrvall A-M, et al. The Manual Ability Classification System (MACS) for children with cerebral palsy: scale development and evidence of validity and reliability. *Dev Med Child Neurol*. 2006 Jul;48(7):549–54.
28. Elvrum A, Andersen G, Himmelmann K, Beckung E, Öhrvall A-M, Vik T, Bimanual Fine Motor Function (BFMF) Classification in Children with Cerebral Palsy: Aspects of Construct and Content Validity, *Physical & Occupational Therapy In Pediatrics*, 2016, 36:1, 1-16.
29. Koman LA, Williams RM, Evans PJ, et al. Quantification of upper extremity function and range of motion in children with cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol* 2008; 50: 910–7.
30. Krumlinde-Sundholm L, Holmefur M, Kottorp A, Eliasson A-C. The Assisting Hand Assessment: current evidence of validity, reliability, and responsiveness to change. *Dev Med Child Neurol*. 2007 Apr;49(4):259–64.
31. Louwers A, Beelen A, Holmefur M2, Krumlinde-Sundholm L, Development of the Assisting Hand Assessment for adolescents (Ad-AHA) and validation of the AHA from 18 months to 18 years. *Dev Med Child Neurol*. 2016 Dec;58(12):1303-1309.

32. Eliasson A-C, Krumlinde-sundholm L, Shaw K, Wang C. Effects of constraint-induced movement therapy in young children with hemiplegic cerebral palsy: an adapted model. *Dev Med Child Neurol*. 2005 Apr;47(4):266–75.
33. Gerber CN, Labruyère R, van Hedel HJA. Reliability and Responsiveness of Upper Limb Motor Assessments for Children With Central Neuromotor Disorders: A Systematic Review. *Neurorehabilitation and Neural Repair*. janv 2016;30(1):19-39.
34. Holmefur MM, Krumlinde-Sundholm L. Psychometric properties of a revised version of the Assisting Hand Assessment (Kids-AHA 5.0). *Developmental Medicine & Child Neurology*. 2016;58(6):618-24.
35. Arnould C, Penta M, Renders A, Thonnard J-L. Abilhand-kids: a measure of manual ability in children with cerebral palsy. *Neurology*. 2004 Sep 28;63(6):1045–52.
36. Bleyenheuft Y, Gordon AM, Rameckers E, Thonnard JL, Arnould C, Measuring changes of manual ability with ABILHAND-Kids following intensive training for children with unilateral cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol*. 2017 May;59(5):505-511.
37. Wu G, van der Helm FCT, (DirkJan) Veeger HEJ, Makhsous M, Van Roy P, Anglin C, et al. ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint motion—Part II: shoulder, elbow, wrist and hand. *Journal of Biomechanics*. mai 2005;38(5):981-92
38. Gage JR. Gait analysis. An essential tool in the treatment of cerebral palsy. *Clin Orthop Relat Res*. mars 1993;(288):126-34.
39. Kontaxis A, Cutti A. G, Johnson G. R, Veeger H. E., A framework for the definition of standardized protocols for measuring upper-extremity kinematics, *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, vol. 24, no. 3, pp. 246–53, 2009.
40. Jaspers E, Desloovere K, Bruyninckx H, Molenaers G, Klingels K, Feys H. Review of quantitative measurements of upper limb movements in hemiplegic cerebral palsy. *Gait & Posture*. nov 2009;30(4):395-404.
41. Mackey AH, Walt SE, Lobb GA, Stott NS. Reliability of upper and lower limb three-dimensional kinematics in children with hemiplegia. *Gait & Posture*. août 2005;22(1):1-9.
42. Mackey AH, Walt SE, Stott NS. Deficits in Upper-Limb Task Performance in Children With Hemiplegic Cerebral Palsy as Defined by 3-Dimensional Kinematics. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. févr 2006;87(2):207-15.
43. Fitoussi F, Diop A, Maurel N, Laassel EM, Penneçot GF. Kinematic analysis of the upper limb: a useful tool in children with cerebral palsy. *J Pediatr Orthop B*. juill 2006;15(4):247-56.
44. Coluccini M, Maini ES, Martelloni C, Sgandurra G, Cioni G. Kinematic characterization of functional reach to grasp in normal and in motor disabled children. *Gait & Posture*. avr 2007;25(4):493-501.
45. Kreulen M, Smeulders MJC, Veeger HEJ, Hage JJ. Movement patterns of the upper extremity and trunk associated with impaired forearm rotation in patients with hemiplegic cerebral palsy compared to healthy controls. *Gait & Posture*. mars 2007;25(3):485-92.
46. Reid S, Elliott C, Alderson J, Lloyd D, Elliott B. Repeatability of upper limb kinematics for children with and without cerebral palsy. *Gait & Posture*. mai 2010;32(1):10-7.
47. Schneiberg S, McKinley P, Gisel E, Sveistrup H, Levin MF, Reliability of kinematic measures of functional reaching in children with cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol*, Jul 2010 ; 52(7) :167–73.
48. Fitoussi F, Diop A, Maurel N, Laasel EM, Ilharreborde B, Penneçot GF. Upper limb motion analysis in children with hemiplegic cerebral palsy: proximal kinematic changes

- after distal botulinum toxin or surgical treatments. *Journal of Children's Orthopaedics*. oct 2011;5(5):363-70.
49. Kreulen M, Smeulders MJC, Veeger HEJ, Hage JJ. Movement patterns of the upper extremity and trunk associated with impaired forearm rotation in patients with hemiplegic cerebral palsy compared to healthy controls. *Gait & Posture*. mars 2007;25(3):485-92.
 50. Butler EE, Ladd AL, Louie SA, LaMont LE, Wong W, Rose J. Three-dimensional kinematics of the upper limb during a Reach and Grasp Cycle for children. *Gait & Posture*. mai 2010;32(1):72-7.
 51. Butler EE, Ladd AL, LaMont LE, Rose J. Temporal-spatial parameters of the upper limb during a Reach & Grasp Cycle for children. *Gait & Posture*. juill 2010;32(3):301-6.
 52. Jaspers E, Feys H, Bruyninckx H, Harlaar J, Molenaers G, Desloovere K. Upper limb kinematics: Development and reliability of a clinical protocol for children. *Gait & Posture*. févr 2011;33(2):279-85.
 53. Jaspers E, Feys H, Bruyninckx H, Cutti A, Harlaar J, Molenaers G, et al. The reliability of upper limb kinematics in children with hemiplegic cerebral palsy. *Gait & Posture*. avr 2011;33(4):568-75.
 54. Jaspers E, Desloovere K, Bruyninckx H, Klingels K, Molenaers G, Aertbeliën E, et al. Three-dimensional upper limb movement characteristics in children with hemiplegic cerebral palsy and typically developing children. *Research in Developmental Disabilities*. nov 2011;32(6):2283-94.
 55. Jaspers E, Feys H, Bruyninckx H, Klingels K, Molenaers G, Desloovere K. The Arm Profile Score: A new summary index to assess upper limb movement pathology. *Gait & Posture*. juin 2011;34(2):227-33.
 56. Riad J, Coleman S, Lundh D, Brostrom E. Arm posture score and arm movement during walking: A comprehensive assessment in spastic hemiplegic cerebral palsy. *Gait & Posture* 33 (2011) 48–53
 57. Mailloux L, Jaspers E, Ortibus E, Simon-Martinez C, Desloovere K, Molenaers G, et al. Clinical assessment and three-dimensional movement analysis: An integrated approach for upper limb evaluation in children with unilateral cerebral palsy. Kellermayer MS, rédacteur. *PLOS ONE*. 3 juill 2017;12(7):e0180196.
 58. Gaillard F, Cretual A, Cordillet S, Le Cornec C, Bouvier B, Heyman R, Marleix S, Bonan I, Rauscent H. Relationship between kinematic motion abnormalities and bimanual performance in children with unilateral cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol*. 2018 Aug;60(8):839-845.
 59. Moura RC, Almeida CS, Dumont AJ, Lazzari RD, Lopes JB, Duarte ND, Braun LA, Oliveira, CS. Kinematic upper limb evaluation of children and adolescents with cerebral palsy: a systematic review of the literature. *Journal of physical therapy science*, 2016 ;28 2, 695-700.
 60. Klotz MCM, Kost L, Braatz F, Ewerbeck V, Heitzmann D, Gantz S, et al. Motion capture of the upper extremity during activities of daily living in patients with spastic hemiplegic cerebral palsy. *Gait & Posture*. mai 2013;38(1):148-52.
 61. Rudisch J, Butler J, Izadi H, Zielinski IM, Aarts P, Birtles D, et al. Kinematic parameters of hand movement during a disparate bimanual movement task in children with unilateral Cerebral Palsy. *Human Movement Science*. 2016;46:239-50.
 62. Schwartz MH1, Trost JP, Wurvey RA. Measurement and management of errors in quantitative gait data. *Gait & Posture* 2004 Oct;20(2):196-203.
 63. Paternostro-Sluga T, Grim-Stieger M, Posch M, Schuhfried O, Vacariu G, Mittermaier C, Bittner C, Fialka-Moser V, Reliability and validity of the medical research Council

- (MRC) scale and a modified scale for testing muscle Strength in patients with radial palsy, *Rehabil Med* 2008; 40: 665–671
64. Mutlu A, Livanelioglu A, Gunel Mk. Reliability Of Ashworth And Modified Ashworth Scales In Children With Spastic Cerebral Palsy. *Bmc Musculoskelet Disord*. 2008;9:44.
 65. Bonett DG, Sample size requirements for estimating intraclass correlations with desired precision *Stat Med*. 2002 May 15;21(9):1331-5.
 66. McGinley et al., (2009). The reliability of three-dimensional kinematic gait measurements: a systematic review, *Gait Posture*
 67. Cristina Simon-Martinez et al, (2017). Negative Influence of Motor Impairments on Upper Limb Movement Patterns in Children with Unilateral Cerebral Palsy. A Statistical Parametric Mapping Study
 68. Winters J. M., Crago P. E. (2012), *Biomechanics and Neural Control of Posture and Movement*, Springer Science & Business Media, 558-5

Table de référence des tableaux

Tableau 1 : DDL d'intérêt du MS mobilisés lors de chaque tâche de la version 1.0 du protocole (représenté par une croix) ; en gris : tâche supprimée de la version 2.0.

Tableau 2 : DDL d'intérêt du MS mobilisés lors de chaque tâche de la version 2.0 protocole (représenté par une croix) ; en bleu : nouvelles tâches en comparaison à la version 1.0 .

Tableau 3 : Caractéristiques et scores cliniques des 5 premiers enfants PCu inclus

Tableau 4 : Paramètres cinématiques (MAX et ROM) de chaque tâche exprimés par la valeur angulaire moyenne avec déviation standard (SD) pour chaque DDL d'intérêt chez les enfants sains.

Table de référence des figures

Figures:

Figure 1: *Tableaux cliniques de la PC spastique*

Figure 2: Physiopathologie de l'atteinte du membre supérieur chez les enfants atteints de PCu

Figure 3 : Schéma des anomalies primaires, secondaires et tertiaires dans l'évolution de la PCu

Figure 4 : Modèle de la CIF

Figure 5 : Déroulement de l'étude chez les enfants atteints de PCu (*ajoutés par la recherche)

Figure 6 : Schéma de la position des marqueurs sur le corps d'un enfant (en vert : marqueurs selon les normes ISB ; en rose : marqueurs pour repérage gauche/droite)

Figure 7 : Plateau de jeu de BE-API V2.0 correspondant au « poste de pilotage » Figure 8 : Environnement ludique lors d'une acquisition 3D avec projection d'un diaporama

Figure 9: Déroulement d'une session du protocole Be-API et sélection des cycles de mouvement (à gauche : version 1.0 avec une session constituée de 3 essais ; à droite : version 2.0)

Figure 10 : Définition des degrés de liberté d'épaule d'après Gates et al., 2016.

Figure 11: Comparaison des paramètres cinématiques (MAX et ROM) des tâches 1, 2 et 5 entre la V1.0 (boîtes à moustache) et la V2.0 (points verts) sur les DDL d'intérêt de chaque tâche pour les enfants PCu et sains

Figure 12: Paramètres ROM de tous les DDL explorés au MS dans les Tâches 3 et 4 (en degré) chez les enfants sains

Figures 13 et 14: Courbes cinématiques des DDL d'intérêt des tâches 3 (flexion-extension de poignet) et 4 (élévation et abduction d'épaule) des 2 sessions chez lesde chaque 5 enfants PCu inclus, rapportées au corridor de normalité établi sur les 10à partir des 9 enfants sains inclus.

Annexes

Annexe 1 : liste exhaustive des méthodes d'évaluation du membre supérieur chez l'enfant atteint de PCu (20)

Tableau de classification des outils d'évaluation du membre supérieur spastique de l'enfant hémiplégique.						
	Outil/ Test	Paramètre évalué	Uni ou bimanuel	Type de passation	Coût	
Structure et fonction corporelle	Goniométrie	Amplitudes articulaires et longueurs tendineuses	Unimanuel	Bilan	Gratuit	
	Echelle d'Ashworth modifiée et Tardieu	Spasticité	Unimanuel	Bilan	Gratuit	
	Testing musculaire	Selectivité de la commande et force musculaire	Unimanuel	Bilan	Gratuit	
	Outils mesurant la force de préhension (Pince de Jamar ou Key pinch)	Force de préhension digito-palmaire ou terminale latérale	Unimanuel	Bilan	Outils payants	
	Outils mesurant la sensibilité	Sensibilité superficielle (pique touche), profonde (statesthésie et kinesthésie), stéréognosies (reconnaissance d'objets usuels)	Unimanuel	Bilan	Gratuit ou Payant selon l'outil choisi	
	Physical Rating Scale /PRS du MS	Amplitudes actives et isolation motrice	Unimanuel	Bilan	Gratuit	
	House (pouce)	Attitude du pouce		Classification	Gratuit	
	Corry	Position du pouce	Unimanuel	Classification	Gratuit	
	Zancolli	Possibilités d'extension du poignet et des doigts	Unimanuel	Classification	Gratuit	
	Bard et Chaléat	Schémas cliniques retrouvés dans la PC	Unimanuel	Classification		
Activité	Capacités	Aires de préhension	Dextérité globale, vitesse exécution	Unimanuel	Bilan	Payant
		Box and Blocks test	Dextérité globale, vitesse exécution	Unimanuel	Bilan	Payant
		Nine Hole Peg test	Dextérité fine	Unimanuel	Bilan	Gratuit
		Purdue Pegboard Test	Dextérité fine, coordination bimanuelle	Uni et Bimanuel	Bilan	Payant
		Heuyer et Baille	Dextérité fine, coordination bimanuelle	Uni et Bimanuel	Bilan	Payant
		Jebson Test	Fonction de la main et de ses performances	Uni et Bimanuel	Bilan	Gratuit
		In Hand Manipulation Test/IHMT	Manipulation à l'intérieur de la main	Unimanuel	Bilan	Gratuit
		Quality of Upper Extremity Skills Test /QUEST	Mouvements dissociés, f(t) d'appui et de protection, préhensions	Unimanuel	Bilan	Gratuit
		Shriners Hospital Upper Extremity Evaluation /SHUEE	Mouvements dissociés, f(t) globale du mbr sup, préhensions	Unimanuel	Bilan	Gratuit
		Melbourne Assessment 2 /MA2	Fonction globale du MS, préhensions, qualité gestuelle	Unimanuel	Bilan	Payant
	Performances	Manual Ability Classification System /MACS et Mini MACS	Echelle fonctionnelle globale basée sur les capacités auto-initiées du maniement d'objets	Unimanuel	Classification	Gratuit
		House (main)	Echelle fonctionnelle globale basée sur le type d'utilisation du membre sup atteint	Unimanuel	Classification	Gratuit
		Assisting Hand Assesment/AHA	Evalue l'efficacité de l'utilisation de la main assistante dans les activités bimanuelles	Bimanuel	Bilan	Payant
		Abilhands Kids	Activité bi manuelle	Bimanuel	Questionnaire	Gratuit
		Mesure d'Indépendance Fonctionnelle pour l'enfant /MIF Mômes	Vie quotidienne	Bimanuel	Questionnaire	Payant
Participation	Children's Hand-use Experience Questionnaire /CHEQ	Evalue la performance de l'enfant dans les activités de la vie quotidienne et l'utilisation de cette main dans ces activités.	Bi-manuel.	Questionnaire	Gratuit	
	Mesure des Habitudes de Vie /MHAVIE	Habitudes de Vie	Bi-manuel	Questionnaire	Payant	
	Mesure Canadienne du Rendement occupationnel / MCRO	Rendement Occupationnel	Bi-manuel	Questionnaire	Payant	

Annexe 2 : Echelles et scores utilisés dans l'évaluation clinique de la performance bimanuelle

Manual Ability Classification System (MACS)

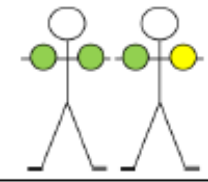
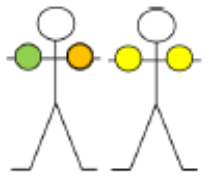
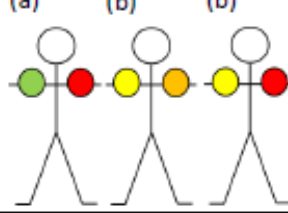
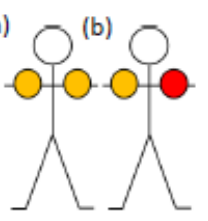
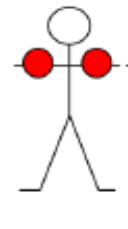
I	Manipule les objets facilement et avec succès. Au plus, a des limitations dans l'aisance à exécuter des tâches manuelles qui requièrent de la vitesse et de l'exactitude. Par contre, n'importe quelle limitation dans les habiletés manuelles ne restreint pas l'autonomie dans les activités quotidiennes.
II	Manipule la plupart des objets mais avec une certaine diminution de la qualité et/ou vitesse de complétion. Certaines activités peuvent être évitées ou complétées mais avec une certaine difficulté; des façons alternatives de performance peuvent être utilisées, mais les habiletés manuelles ne restreignent habituellement pas l'autonomie dans les activités quotidiennes.
III	Manipule les objets avec difficulté; a besoin d'aide pour préparer et/ou modifier les activités. La performance est lente et complétée avec un succès limité en ce qui concerne la qualité et la quantité. Les activités sont exécutées de façon autonome si elles ont été organisées préalablement ou adaptées.
IV	Manipule une sélection limitée d'objets faciles à utiliser dans des situations adaptées. Exécute des parties d'activités avec effort et un succès limité. Requiert un support continu et de l'assistance et/ou de l'équipement adapté, même pour une réalisation partielle de l'activité.
V	Ne manipule pas les objets et a une habileté sévèrement limitée pour performer même des actions simples. Requiert une assistance totale.

Echelle Modifiée de House (MHC)

CLASSIFICATION	DÉSIGNATION	NIVEAU D'ACTIVITÉ
0	N'utilise pas –	L'extrémité n'est pas utilisée pour l'achèvement de la tâche.
1	Assistance passive faible –	Utilisée seulement lors de la stabilisation du poids.
2	Assistance passive –	Peut maintenir un objet placé dans sa main, il peut maintenir cet objet à des fins d'utilisation grâce à l'autre main.
3	Assistance active faible –	Peut effectuer une préhension active de l'objet et stabiliser celui-ci grâce à l'autre main à des fins d'utilisations
4	Assistance active –	Peut effectuer une préhension active de l'objet et stabiliser celui-ci grâce à l'autre main à des fins d'utilisations, peut manipuler l'objet avec la main malade.
5	Utilisation spontanée, partielle ou complète –	Effectue des activités bi-manuelles facilement, peut utiliser ses mains spontanément ou sans aide de l'autre main.

Bimanual Fine Motor Function

BFMF version 2.0

<p>Level I One hand: manipulates without restrictions. The other hand: manipulates without restrictions or limitations in more advanced fine motor skills</p>	
<p>Level II (a) One hand: manipulates without restrictions. The other hand: only ability to grasp or hold (b) Both hands: limitations in more advanced fine motor skills</p>	<p>(a) (b)</p> 
<p>Level III (a) One hand: manipulates without restrictions. The other hand no functional ability (b) One hand: limitations in more advanced fine motor skills. The other hand: only ability to grasp or worse</p>	<p>(a) (b) (b)</p> 
<p>Level IV (a) Both hands: only ability to grasp (b) One hand: only ability to grasp. The other hand: only ability to hold or worse</p>	<p>(a) (b)</p> 
<p>Level V Both hands: only ability to hold or worse</p>	

Assisting Hand Assessment (AHA)

Nom		Hémipl	Plex	D	G	atteint
Date d'évaluation		Autre		D	G	dominant
Date de naissance		Maître de jeu				
Âge : Années :		0 années	mois :	Evaluateur		
AHA						
Assisting Hand Assessment, version 4.4 française						
		Score	Observations			
ITEMS D'UTILISATION GÉNÉRALE	Contact avec l'objet <i>(Approaches objects)</i>	4				
		3				
		2				
		1				
	Initie l'utilisation <i>(Initiates use)</i>	4				
		3				
		2				
		1				
	Choisit l'AH lorsqu'elle est plus proche <i>(Chooses AH when closer to objects)</i>	4				
		3				
		2				
		1				
ITEMS D'UTILISATION DU MEMBRE SUPÉRIEUR	Stabilise par l'appui ou le contre-appui <i>(Stabilizes by weight or support)</i>	4				
		3				
		2				
		1				
	Atteint <i>(Reaches)</i>	4				
		3				
		2				
		1				
	Bouge le bras <i>(Moves upper arm)</i>	4				
		3				
		2				
		1				
	Bouge l'avant bras <i>(Moves forearm)</i>	4				
		3				
		2				
		1				
ITEMS D'ATTRAPER - RELACHER	Attrape <i>(Grasps)</i>	4				
		3				
		2				
		1				
	Tient <i>(Holds)</i>	4				
		3				
		2				
		1				
	Stabilise par la préhension <i>(Stabilizes by grip)</i>	4				
		3				
		2				
		1				
	Réajuste la préhension <i>(Readjusts grip)</i>	4				
		3				
		2				
		1				

ITEMS D'ATTRAPER - RELACHER	Varie les types de préhension <i>(Varies type of grasp)</i>	4		
		3		
		2		
		1		
	Relâche <i>(Releases)</i>	4		
		3		
		2		
		1		
	Pose <i>(Places)</i>	4		
		3		
		2		
		1		
ITEMS D'AJUSTEMENT MOTEUR FIN	Bouge les doigts <i>(Moves fingers)</i>	4		
		3		
		2		
		1		
	Adapte la force <i>(Calibrates)</i>	4		
		3		
		2		
		1		
	Manipule <i>(Manipulates)</i>	4		
		3		
		2		
		1		
COORDINATION	Coordonne <i>(Coordinates hands/arms)</i>	4		
		3		
		2		
		1		
	Orie les objets <i>(Orients objects)</i>	4		
		3		
		2		
		1		
ITEMS DE RYTHME	Enchaîne / Poursuit <i>(Proceeds)</i>	4		
		3		
		2		
		1		
	Change de stratégie <i>(Changes strategy)</i>	4		
		3		
		2		
		1		
	Fluidité dans la réalisation de la tâche <i>(Flow in bimanual task performance)</i>	4		
		3		
		2		
		1		
Score total				
Score pondéré		-33	%	

ABILHAND-Kids - Manual Ability Measure
French version

Patient _____

Date _____

Quelle est la DIFFICULTE des activités suivantes?	Impossible	Difficile	Facile	?
1. Ouvrir un pot de confiture				
2. Mettre un sac à dos				
3. Ouvrir le capuchon du tube de dentifrice				
4. Ouvrir une tablette de chocolat				
5. Se laver le haut du corps				
6. Retourner la manche d'un pull				
7. Tailler un crayon				
8. Enlever un T-shirt				
9. Etaler du dentifrice sur une brosse à dents				
10. Ouvrir une boîte à tartines				
11. Dévisser le bouchon d'une bouteille				
12. Fermer la tirette d'un pantalon				
13. Boutonner une chemise ou un pull				
14. Remplir un verre d'eau				
15. Allumer une lampe de chevet				
16. Mettre un bonnet				
17. Fermer la pression d'une veste				
18. Boutonner un pantalon				
19. Ouvrir un paquet de chips				
20. Fermer la tirette d'une veste				
21. Prendre de la monnaie dans la poche				

Annexe 3 : Echelles utilisées lors du bilan en kinésithérapie pour évaluer la force motrice, la sélectivité motrice et la spasticité.

Echelle d'évaluation de la force :

0 = absence de contraction ;

1 = contraction perceptible sans déplacement du segment ;

2 = contraction entraînant un déplacement du segment quel que soit l'importance de l'angle parcouru;

3 = le déplacement peut s'effectuer contre une légère résistance ;

4 = le déplacement peut s'effectuer contre une résistance plus importante ;

5 = le mouvement est d'une force identique à celle du côté sain / mouvement contre résistance + endurance

Echelle, Contrôle Moteur Sélectif (CMS) :

0 = pas de CMS, minime contraction

0,5 = contraction et mouvements minimes et/ou beaucoup de cocontractions

1 = mauvais contrôle sélectif, commande dissociée, mouvement limité, cocontractions possibles

1,5 = CMS correct mais défaut de fluidité ou limitation dans le mouvement (cocontractions)

2 = CMS parfait, contraction et muscles appropriés

Echelle d'Ashworth Modifiée (MAS)

0 = Tonus musculaire normal

1 = Augmentation discrète du tonus musculaire se manifestant par un ressaut suivi d'un relâchement ou par une résistance minime en fin de mouvement

1+ = Augmentation discrète du tonus musculaire se manifestant par un ressaut suivi d'un relâchement ou par une résistance minime perçue sur moins de la moitié de l'amplitude articulaire

2 = Augmentation plus marquée du tonus musculaire touchant la majeure partie de l'amplitude articulaire, l'articulation pouvant être mobilisée facilement.

4 = L'articulation concernée est fixée en flexion ou extension, abduction, adduction

Quatrième de couverture

Résumé (en Français)

Introduction : Un nouveau protocole 3D bimanuel, “Be an Airplane Pilot” (BE-API) a été créé pour évaluer les déficiences au membre supérieur (MS) des enfants atteints de Paralyse Cérébrale unilatérale (PCu). Sa faisabilité et reproductibilité inter-essais étaient excellentes sur 20 enfants sains et 20 PCu. Pour améliorer ce protocole, une nouvelle version, BE-API 2.0, a été développée et sa validation a été évaluée. **Matériel et méthode:** Deux nouvelles tâches ont été intégrées. Les courbes cinématiques, les valeurs angulaires maximales et les amplitudes articulaires d'épaule, coude et poignet ont été calculées. 20 enfants PCu (11.3 ± 2.9 ans) ont été appariés sur l'âge à 20 enfants sains. Pour évaluer la reproductibilité inter-session, les enfants PCu ont réalisés deux sessions séparées de 2 à 4 semaines. Des mesures cliniques, comprenant l'Assisting Hand Assessment (AHA) et l'Abilhand-kids, ont été réalisées chez les enfants PCu afin d'étudier leur corrélation avec la cinématique. **Résultats:** Chez les premiers participants inclus, la faisabilité de BE-API 2.0 était excellente. Dans les deux nouvelles tâches, les degrés de liberté attendus ont été mobilisés dans de larges amplitudes: respectivement l'élévation d'épaule, plan d'élévation d'épaule, et extension de poignet. Les enfants PCu avaient moins d'élévation d'épaule, plan d'élévation et extension de poignet que les enfants sains. **Discussion:** La nouvelle version de BE-API répond aux limites de la précédente version, avec des tâches reproductibles et discriminantes, qui mettent en évidence les anomalies du mouvement des enfants PCu en situation bimanuelle. En attendant les résultats finaux de l'étude, la reproductibilité inter-jour et la comparaison aux enfants sains sont très prometteuses.

Mots-clés : Paralyse Cérébrale unilatérale ; analyse 3D du mouvement ; membre supérieur ; tâche bimanuelle ; performance bimanuelle

Abstract (in English)

Introduction: A new 3D bimanual protocol, “Be an Airplane Pilot” (BE-API), was created to evaluate upper limb (UL) motor impairments in children with unilateral Cerebral Palsy (uCP). Its feasibility and inter-trials reliability was excellent on 20 typically developing children (TDC) and 20 children with uCP. To improve the existing protocol, a new version, BE-API 2.0, was developed and its validation was evaluated. **Materials and methods:** Two new bimanual tasks were integrated. The angular waveforms, the maximum angles and the range of motion of shoulder, elbow and wrist joints, were calculated. 20 children with uCP (11.3±2.9 years) were matched on age with 20 TDC. To assess inter-session reliability, children with uCP performed two sessions separated from 2 to 4 weeks. Clinical measures including the Assisting Hand Assessment (AHA) and Abilhand-kids were passed by uCP children to explore relations with kinematic. **Results:** Among the first participants included, the feasibility of the BE-API 2.0 was excellent. In the two new tasks, degrees of freedom expected were mobilized in large range of motion: respectively shoulder elevation (X...), plan of elevation (X...), and wrist extension (X...). Children with uCP had lower shoulder elevation, plan of elevation, and wrist extension than TDC. **Discussion:** The new version of BE-API responds to the limits of the previous one, with reliable and discriminative tasks, which highlight movement impairments of uCP children in bimanual situation. Expending the final results of the study, the between-day reliability and comparison with TDC are very promising.

Keywords : Unilateral cerebral palsy ; three dimensional movement analysis ; upper limb ; bimanual task ; bimanual performance