



Rapport de stage

Evaluation de l'impact biomécanique de la thérapie HABIT-ILE sur de jeunes enfants atteints de Paralysie Cérébrale

Prénom, NOM : Yann MAHEU

Parcours master : Biomécanique

Année master : 2

Tuteur universitaire : Franck JOURDAN

Président de jury : Laurent WALTZ

Responsable des stages : Sandra BOUVIER – Mathieu LEMPEREUR

Date du rendu : 15/06/2022

Lieu de stage : LaTIM (UMR 1101) – BEaCHILD, Brest (29)

Mots clés

Nature de l'activité	Branche de l'activité économique	Domaine technologique	Application physique directe	Code de simulation
Recherche Fondamentale (RF)	Service non marchands (fonction publique) – (SNM)	Base de données (BdD)	Analyse de Données – Logiciels (DLOG)	Autres (AUT)

Remerciements

Je remercie mes deux tuteurs de stage : Sandra BOUVIER et Mathieu LEMPEREUR pour tout le temps qu'ils m'ont accordé, que ce soit pour m'aider en termes de programmation, de biomécanique, d'anatomie, etc. Mais aussi pour la relecture et les conseils qu'ils m'ont donné dans la rédaction de mon rapport.

Merci à l'équipe pédagogique de l'université de Montpellier, à M. JOURDAN qui m'a tuteuré pendant ce stage, et à M. LAURENT pour son travail d'organisation et son aide administrative.

Merci à l'ensemble de l'équipe BEaCHiLD, ainsi qu'au groupe de travail Follow Knee pour leur bienveillance et leur sympathie.

Avant-propos

Le Laboratoire de Traitement de l'Information Médicale (LaTIM) est une unité mixte (UMR1101) de l'Institut National de la Santé Et de la Recherche Médicale (INSERM), de l'Université de Bretagne Occidentale (UBO), de l'IMT Atlantique et associant le Centre Hospitalier Universitaire (CHU) de Brest.

Cet organisme est organisé en deux équipes, IMAGINE (Intégration d'information multimodalité pour l'aide à la décision et l'optimisation du geste en thérapies interventionnelles) et ACTION (Action thérapeutique guidée par l'imagerie multimodale en oncologie). Situé au sein du LaTIM et de l'équipe IMAGINE, le premier groupement d'intérêt scientifique français centré sur la réadaptation pédiatrique BEaCHILD (centre breton de recherche et d'innovation technologique pour le développement et la Réadaptation de l'enfant) a pour vocation de comprendre et d'améliorer la motricité de l'enfant afin d'augmenter son autonomie et sa participation sociale.

Ce groupe réunit une équipe de chercheurs pluridisciplinaires avec diverses compétences en rééducation pédiatrique, kinésithérapie, ergothérapie, ingénierie informatique et mouvement.

Le projet Early HABIT-ILE (Hand and Arm Bimanual Intensive Therapy Including Lower Extremity) financé par la fondation Paralysie Cérébrale (PC) est une étude multicentrique européenne, contrôlée, randomisée et s'intitule: *"Functional, neuroplastic and biomechanical changes induced by early Hand and Arm Bimanual Intensive Therapy Including Lower Extremities in pre-school children with uni-and-bilateral cerebral palsy : a European project"*.

Le but de ce projet est d'évaluer l'impact fonctionnel, neurophysiologique et biomécanique chez des enfants atteints de PC unilatérale et bilatérale d'âge préscolaire. 110 enfants (50 avec atteinte unilatérale et 60 avec atteinte bilatérale) ont été inclus dans 4 centres d'inclusion (Bruxelles, Brest, Pise et Angers).

La partie biomécanique du projet coordonnée par le CHU de Brest et le CHUV de Lausanne a pour but d'observer les modifications biomécaniques induites par cette thérapie chez des enfants d'âge préscolaire avec PC. Une analyse 3D du mouvement des membres supérieurs lors de tâches uni et bimanuelles a été réalisé à J0 et J90.

Ce projet de master 2 s'intéressera spécifiquement à l'impact de la thérapie HABIT-ILE sur une tâche simple de Reach to touch (Atteindre pour toucher) chez des enfants d'âge préscolaire avec PC bilatérale.

RESUME

Contexte : La thérapie HABIT-ILE a démontré des améliorations au niveau des membres supérieurs et inférieurs chez les enfants atteints de PCbi (Paralysie Cérébrale bilatérale) âgés de plus de 6 ans. L'efficacité de cette thérapie sur les enfants de moins de 5 ans sur des critères de jugement biomécaniques reste à prouver.

Objectif : Évaluer l'impact biomécanique de la thérapie HABIT-ILE sur de jeunes enfants atteints de paralysie cérébrale (PC).

Méthode : 52 enfants ont été inclus dans un essai randomisé contrôlé afin d'évaluer l'impact de la thérapie HABIT-ILE sur le mouvement du Membre Supérieur (MS). Les enfants ont été séparés en deux groupes de manière aléatoire et équilibrée. Ceux du groupe CONV ont suivi une thérapie conventionnelle, ceux du groupe HABIT-ILE ont suivi une thérapie du même nom sur 10 jours. L'évaluation s'est faite sur 2 périodes : la date de référence (J0), puis trois mois après (J90) à travers une analyse quantifiée du mouvement et à l'aide d'un système opto-électronique. L'enfant devait réaliser une tâche 'd'atteindre pour toucher'. Le critère de jugement principal est un paramètre de fluidité : SPARC. Les critères de jugement secondaires sont des Paramètres Spatio-Temporels (PST), des paramètres de fluidité, de rectitude et de cinématique.

Résultats : L'analyse statistique n'a pas encore été réalisée sur la totalité des enfants. Pour l'instant, l'étude des résultats d'un seul enfant du groupe HABIT-ILE ne semble pas indiquer de changements importants dans le mouvement de celui-ci.

Mots clés : enfant, paralysie cérébrale, HABIT-ILE, analyse quantifiée du membre supérieur, cinématique, paramètre spatio-temporel, paramètre de fluidité, paramètre de rectitude.

ABSTRACT

Background: HABIT-ILE therapy has demonstrated improvements in the upper and lower limbs in children with Bilateral Cerebral Palsy over the age of 6 years. The effectiveness of this therapy on children under 5 years of age on biomechanical outcomes remains to be proven.

Objective: Evaluate the biomechanical impact of HABIT-ILE therapy on young children with cerebral palsy.

Method: 52 children were included in a randomized controlled trial to assess the impact of HABIT-ILE therapy on Upper Limb movement. The children were separated into two groups in a random and balanced way. Those in the CONV group followed a conventional therapy, those in the HABIT-ILE group followed a therapy of the same name over 10 days. The evaluation was made over 2 periods: the reference date (J0), then three months later (J90) through a quantified analysis of the movement and using an opto-electronic system. The child had to perform a reach-to-touch task. The main judgment criterion is a fluidity parameter: SPARC. The secondary outcomes are spatio-temporal parameters, fluidity parameters, straightness parameters and kinematics parameters.

Results: For the moment the statistical results have not been released. The analysis of the results of a HABIT-ILE child does not seem to indicate significant changes in the movement of this child.

Key words: child, HABIT-ILE cerebral palsy, quantified upper limb analysis, kinematics, spatio-temporal parameter, fluidity parameter, straightness parameter.

Liste des abréviations

- PC : Paralyse Cérébrale
- PCu : Paralyse Cérébrale unilatérale
- PCbi : Paralyse Cérébrale bilatérale
- CAP : **C**hangements induits par la thérapie HABIT-ILE chez des enfants avec paralysie cérébrale en **A**ge **P**réscolaire
- HABIT : Hand and Arm Bimanual Intensive Therapy
- GMFCS : Gross Motor Function Classification System
- Mini-MACS : Mini-Manual Ability Classification System
- e-HABIT-ILE : early Hand and Arm Bimanual Intensive Therapy Including Lower Extremity
- MOCAP : Motion Capture
- CMIT : Constraint-Induced Movement Therapy
- MS: Membres supérieurs
- MI: Membres inférieurs
- PST : Paramètres spatio-temporels
- AHA : Assisting Hand Assessment
- MA2 : Melbourne Assessment 2
- DT : Développement Typique
- TP : Time to Peak
- SPARC : Spectral Arc Length
- UM : Unité de Mouvement
- UMT : Unité de Mouvement de Transport
- NP0 : Nombre de passage par 0
- RV : Ratio de vitesse
- DLJ : Dimensionless Jerk
- LDLG : Logarithm Dimensionless Jerk
- ROM : Range Of Motion
- IR : Indice de Courbure

Table des matières

Remerciements	2
Avant-propos.....	3
Liste des abréviations	5
Introduction	7
A. Méthode	11
1. Participants	11
2. Procédure de test.....	12
<i>Paramètres de laboratoire</i>	12
<i>Procédure d'acquisition</i>	12
3. Data Processing.....	14
<i>Pré traitement</i>	14
<i>Traitement</i>	18
<i>Critère de jugement principal</i>	18
<i>Critère de jugement secondaire</i>	19
4. Analyse statistique	19
B. Résultats	20
1. Etude de flux	20
2. Caractéristiques démographiques et cliniques des sujets	20
3. Début et fin du mouvement.....	22
4. Description cinématique du geste 'Atteindre le Buzzer'	23
5. Analyse des résultats sur un sujet CONV et un sujet HABIT-ILE.....	24
<i>Groupe CONV</i>	24
<i>Groupe HABIT ILE</i>	25
C. Discussion.....	26
Références.....	28
Liste des figures.....	30
Liste des tableaux	30
Annexes	31
<i>Annexe 1 : Détail des paramètres utilisés</i>	31
<i>Annexe 2 : Diagramme de flux de l'étude</i>	33
<i>Annexe 3 : Modèle Cinématique</i>	34
<i>Annexe 4 : Rapport Patient 02.11.02</i>	36
<i>Annexe 4 : Rapport Patient 02.10.01</i>	47

Introduction

La Paralyse Cérébrale (PC) est une pathologie neurologique non évolutive survenant sur un cerveau en développement¹. Son incidence reste élevée avec 2 à 3,6 enfants atteints pour 1000 naissances². La prématurité et les problématiques d'accouchement (asphyxie ou déficit d'oxygénation) suivis des accidents vasculaires cérébraux constituent les facteurs de risques majeurs d'apparition d'une PC². La PC affecte la motricité, le mouvement des membres, la posture, et est souvent associée à un trouble de la sensibilité et de la cognition^{3,4}. Ces déficiences résultent d'anomalies structurelles du cerveau apparaissant à différentes périodes de son développement et affectant des processus de maturation différents comme la migration neuronale, la différenciation, la croissance neuronale ou encore la myélinisation^{5,6}. La période de survenue de la lésion, sa localisation mais aussi son étendue⁷ ont un impact majeur sur le fonctionnement du cortex. Les symptômes apparaissant généralement avant l'âge de 18 mois, le diagnostic est régulièrement confirmé entre 13 et 19 mois de vie⁸. L'âge tardif de ce diagnostic tend à diminuer avec l'apparition de méthodes de dépistage précoce⁹. Le développement d'une rééducation motrice précoce suivant le diagnostic est devenu une priorité urgente dans le domaine de la neuro-rééducation pédiatrique.

De nombreuses thérapies de rééducation¹¹ et essais cliniques ont ainsi démontré l'importance pour l'apprentissage moteur de : mouvements actifs, répétitions, entraînements bimanuels¹¹, haute intensité¹², objectifs centrés sur l'activité, attention et motivation, cadre structuré¹³ et environnement enrichi¹⁴.

Pour les enfants avec PC, trois thérapies ont particulièrement démontré leur efficacité : CIMT (Constraint-Induced Movement Therapy), HABIT (Hand and Arm Bimanuel Intensive Therapie) et HABIT-ILE (Hand and Arm Bimanual Intensive Therapy Including Lower Extremities). CIMT et HABIT ne ciblent pas simultanément le membre supérieur et le membre inférieur pour des enfants avec une paralysie cérébrale bilatérale¹⁰.

La méthode de rééducation HABIT-ILE se base sur HABIT¹⁵ et propose une méthode de rééducation intensive des membres supérieurs **et** inférieurs, à travers des activités bimanuelles adaptées aux capacités, à l'âge, aux intérêts de l'enfant. L'accroissement de la difficulté dépend de ses performances¹⁶. A travers un stage de 90 heures effectué en petits groupes (<12 personnes) pendant 2 à 3 semaines l'enfant effectue des tâches motrices structurées de difficulté croissante et des activités fonctionnelles. Il a été démontré que la méthode HABIT-ILE permet une amélioration fonctionnelle des MS et MI pour des enfants de plus de 6 ans, avec un score GMFCS de II ou III, sans déficit cognitif¹⁷. Néanmoins, les enfants avec une PC atteignent 90% de leur capacité motrice à environs 5 ans¹⁸, ils sont aussi plus réceptifs aux stimuli environnementaux¹⁹. C'est pourquoi de nombreux articles scientifiques considèrent qu'il est primordial d'agir le plus tôt possible chez l'enfant^{20,21,22}. Récemment, Morgan et al.²³ ont recommandé d'effectuer des thérapies bimanuelles et CIMT à la suite du diagnostic de PCu. Dans cette optique, le projet CAP (**C**hangements induits par la thérapie HABIT-ILE chez des enfants avec paralysie cérébrale en **A**ge **P**réscolaire) a été conduit pour mesurer l'impact d'HABIT-ILE chez les enfants PC d'âge préscolaire (de 1 à 4 ans) au niveau fonctionnel, neuroplastique et biomécanique à court, moyen et long terme²⁴. Ce projet se divise en 2 essais contrôlés randomisés (ECT) : le premier ECT incluant 50 enfants avec PCu a comme critère de jugement principal l'Assisting Hand Assesment (AHA) qui évalue

l'assistance de la main non dominante lors d'activité bimanuelle. Le deuxième ECT incluant 60 enfants avec PCbi a comme critère de jugement principal la GMFM (Gross Motor Function Measure) qui évalue la motricité globale de l'enfant.

Ce projet de master 2 s'intéresse au deuxième essai contrôlé randomisé.

Les évaluations fonctionnelles citées ci-dessus sont basées sur l'observation subjective d'un praticien.

L'analyse tridimensionnelle permet une description objective du mouvement à l'aide d'outils techniques et de calculs mathématiques²⁶ et se révèle parfois plus sensible que les évaluations fonctionnelles. L'analyse quantifiée des MS²⁷ est moins répandue que celle de la marche qui est moins libre et cyclique donc plus simple à étudier²⁸. Par ailleurs, pour les MS, il y a un manque de consensus quant aux tâches à effectuer²⁶.

Les mouvements du MS les plus étudiés en analyse du mouvement pour les enfants sont ceux de saisir, d'attraper²⁶, des fonctions qui sont acquises par l'enfant avec un DT avant 6 mois²⁹.

Le mouvement peut être caractérisé par 3 types de paramètres²⁷ :

- Les paramètres spatio-temporels : vitesse moyenne, vitesse maximale, durée, durée pour atteindre la vitesse maximale
- Les paramètres de qualité de la trajectoire mesurant la fluidité et la rectitude du mouvement.
- Les paramètres de cinématique mesurant le mouvement :

Ces différents paramètres sont détaillés dans les tableaux ci-dessous :

	Paramètre	Définition	Article
Fluidité	Nombre de passage par 0	Nombre de passage par 0 de la courbe d'accélération	Sandlund et al. 2014
	Rapport entre Vitesse moyenne et Vitesse maximale	Rapport entre Vitesse moyenne et Vitesse maximale	
	Unité de Mouvement	Nombre de maximums locaux de la norme de la vitesse	Hogan et al. 2009
	Unité de mouvement de transport	La longueur de la 1ère unité de mouvement sur la longueur total du mouvement	Boxum et al. 2017
	SPARC	Spectral Arc Length - Longueur de la courbe du profil de la transformée de Fourier de la vitesse	Balasubramanian et al. 2011
	JERK	Dérivée de l'accélération	Hogan et al. 2009
Rectitude	Indice de courbure	Rapport de la distance parcourue sur la distance efficace	Butler et al. 2012

Tableau 1 : Paramètres de qualité de la trajectoire

	Paramètre	Définition	Article
Cinématique	Amplitude de mouvement	Angle maximal moins angle minimal	Hurvitz et al. 2003, Mackey et al. 2008, Beretta et al. 2018, etc.
	Allure des courbes des angles d'Euler	Valeur des angles d'Euler au cours du temps	Florence Gaillard et al. 2019

Tableau 2 : Paramètres de cinématique

Jasper et al.²⁶ ont fait une méta-analyse des mesures quantitatives des mouvements des MS des enfants avec PC hémiplégique. Ils mettent en évidence les variations des PST, des paramètres de fluidité, de rectitude et de cinématique pour les tâches 'd'atteindre pour toucher' et d'atteindre pour attraper pour les enfants avec PC en comparaison avec les enfants TD (tableau 3). Par exemple, les enfants TD ont une durée de mouvement plus courte.

Comparaison TD/PC	PST	Qualité de la trajectoire	Cinématique
<ul style="list-style-type: none"> Atteindre pour toucher Atteindre pour attraper 	<ul style="list-style-type: none"> Durée du mouvement ↘ Vitesse moyenne ↗ Vitesse maximale ↗ Durée jusqu'au pic de vitesse ↘ 	<ul style="list-style-type: none"> Unité de mouvement ↘ Rapport de vitesses ↗ Unité de mouvement de transport ↗³² Nombre de passages par 0 ↘ 	<ul style="list-style-type: none"> Extension de l'épaule ↗ Abduction de l'épaule ↗ Extension du coude ↗ Supination du coude ↗ Flexion du tronc ↘

Tableau 3 : Variation des PST, des paramètres de qualité et de cinématique

↗ : augmentation, ↘ : diminution

L'impact des thérapies CIMT, HABIT et HABIT-ILE sur le mouvement des enfants avec PC a été étudié dans les articles suivants :

Article	Population	Thérapie	Tâche	Paramètres	Résultats
Schneiberg 2010	12 enfants avec PC Age médian : 9 ans	Thérapie axée sur les tâches d'entraînement	Atteindre un objet	Fluidité (Unité de mouvement), Cinématique (extension du coude, déplacement du tronc)	Dans certains cas amélioration de la fluidité, augmentation de l'amplitude de mouvement de l'extension du coude, déplacement du tronc réduit
Hung 2011	20 enfants avec PC Age moyen : 6,9 ans Ecart-type : 2 ans	HABIT et CIMT	Tâche bimanuelle d'ouverture de tiroir	Coordination des mains	Meilleure synchronisation des 2 MS
Chen et al. 2014	43 enfants avec PC allant de 6 à 12 ans	hCIT	Atteindre pour saisir	Spatio-temporel (durée normalisée, vitesse maximale) Fluidité (unité de mouvement normalisée)	Diminution de la durée du mouvement, diminution du nombre d'unité de mouvement
Hung 2018	7 enfants avec PC Age moyen : 43 mois Ecart-type : 9 mois	HABIT-H	Tâche bimanuelle d'ouverture de tiroir	Cinématique (déplacement du tronc) Coordination des mains	Diminution du mouvement compensatoire proximal du tronc, meilleure synchronisation des 2 MS
Hung 2020	20 enfants avec PC Age moyen : 7,7 ans Ecart-type : 2 ans	HABIT et CIMT	Atteindre un objet et l'attraper	Spatio-temporel (durée), Rectitude, Cinématique	Diminution de la durée du mouvement, diminution de l'indice de courbure, augmentation du ROM de l'épaule et du poignet, diminution de l'activation du tronc
Maitre et al. 2020	73 enfants avec PC Age médian : 12 mois IQR : 8 mois	mCIMT-BiT	Atteindre un objet	Fluidité (unité de mouvement), Rectitude (indice de courbure)	Diminution de l'unité de mouvement, diminution de l'indice de courbure
Simon Martinez et al. 2020	36 enfants avec PC allant de 6 à 12 ans	mCIMT	Atteindre vers le haut, atteindre pour attraper, toucher son épaule	Spatio-temporel (durée, vitesse maximale, durée jusqu'à la vitesse maximale) Rectitude (Indice de courbure)	Augmentation de la vitesse maximale, diminution de l'indice de courbure

Tableau 4 : Tableau récapitulatif des évaluations biomécaniques de méthode de rééducation pour enfants avec PC

Peu d'études mesurent l'impact de ces thérapies sur le mouvement des enfants d'âge préscolaire.

Ce travail a pour objectif de comparer les paramètres spatio-temporels, les paramètres de qualité du mouvement ainsi que la cinématique des MS d'un enfant atteint de PC bilatérale avant et après la thérapie HABIT-ILE.

Notre hypothèse est qu'il y aura une différence significative des paramètres spatio-temporels, de qualité du mouvement après la thérapie HABIT-ILE pour les enfants ayant ce type de rééducation (groupe HABIT-ILE), mais pas pour les enfants sans cette rééducation (groupe CONV).

L'hypothèse principale est qu'après un stage HABIT-ILE, le mouvement de l'enfant sera plus fluide, ce qui se traduira par une diminution du SPARK notre critère de jugement principal.

Les hypothèses secondaires sont les suivantes :

Après un stage HABIT-ILE, les enfants PC d'âge préscolaire présenteront en moyenne une amélioration significative des PST avec une augmentation de la vitesse moyenne, de la vitesse maximale, une diminution de la durée, de la durée jusqu'au pic de vitesse. Ils présenteront également une amélioration des autres paramètres de fluidité qui se traduira par une augmentation du Log JERK (LDLJ), de l'unité de mouvement de transport (UMT), du rapport entre la vitesse moyenne et la vitesse maximale (RV), une diminution de l'unité de mouvement (UM), du nombre de passage par 0 (NP0). La rectitude sera aussi améliorée avec une diminution de l'indice de courbure. Les paramètres de cinématique ne seront pas modifiés à l'échelle du groupe mais peut-être de manière individuelle.

A. Méthode

1. Participants

60 sujets atteints de PCbi ont été recrutés pour cette étude.

Ils ont été sélectionnés selon les critères d'inclusion suivants :

- PCbi, spastique (exagération anormale du réflexe myotatique, c'est-à-dire de la contraction naturelle d'un muscle) ou dyskinétique (mouvements anormaux involontaires)
- Age compris entre 1 et 4 ans
- Être capable de suivre les instructions et d'effectuer les tâches requises
- Consentement écrit libre, éclairé et signé par au moins un parent

Les critères de non-inclusions sont les suivants :

- Antécédent d'injection de toxine botulique ou opération de correction orthopédique
- Epilepsie non contrôlée
- Déficit cognitif, visuel, auditif, ou douleur rendant les évaluations impossibles
- Présence de contre-indications au passage d'un IRM tels que des implants en métal
- Participer à un autre protocole de recherche en cours
- Parents refusant que leur enfant participe à l'étude

Les participants sont alors répartis aléatoirement dans 2 groupes :

- CONV : l'enfant suit ses séances de thérapie conventionnelle
- HABIT-ILE : l'enfant participe par groupe de 6 à 9 (enfants par groupe) à HABIT-ILE pendant 10 jours à hauteur de 5h par jour. Soit un total de 50h de thérapie bimanuelle intensive, conformément au volume horaire défini dans l'article²⁸. Chaque enfant était accompagné par 2 adultes au moins, 1 thérapeute et 1 étudiant thérapeute. Préalablement au stage, des objectifs fonctionnels de la vie quotidienne sont définis par les parents avec l'aide de l'équipe de supervision du stage. Les mouvements nécessaires à la réalisation de ses objectifs sont identifiés par l'équipe de supervision et seront entraînés pendant le stage sous forme de jeux en modulant l'environnement de l'enfant. La deuxième partie du stage sera consacrée à la réalisation des objectifs fonctionnels.

Les enfants ont été recrutés sur une période de 12 mois, ils ont participé à l'étude pendant 3 mois, le groupe contrôle a reçu la thérapie HABIT-ILE après l'évaluation à J+90 dans un but d'équité.

Une approbation éthique a été obtenue pour chaque laboratoire impliqué dans cette étude : Belgique (B403201316810), Italie (244/2019) et France (29BRC19.0050/N2019-A01173–54). Toutes les données ont été traitées anonymement et cette étude est enregistrée dans le Registre des études cliniques (NCT04017871).

2. Procédure de test

Paramètres de laboratoire

Les différentes tâches ont été enregistrées dans 4 laboratoires de mouvement : Brest (France), Nantes (France), Bruxelles (Belgique), Pise (Italie). Les systèmes d'analyse du mouvement pour chaque laboratoire sont les suivants :

- Brest : système Vicon Nexus avec 15 caméras infrarouge et 2 caméras vidéo avec une fréquence d'acquisition à 100Hz
- Nantes : système Vicon Nexus avec 22 caméras infrarouge et 3 caméras vidéo avec une fréquence d'acquisition à 100Hz
- Bruxelles : système Vicon Nexus avec 8 caméras infrarouge et 1 caméra vidéo avec une fréquence d'acquisition à 100Hz
- Pise : système BTS avec 11 caméras infrarouge et 2 caméras vidéo avec une fréquence d'acquisition de 200 Hz

Procédure d'acquisition

L'évaluation a été réalisée à J0 et J90.

Trente-quatre marqueurs ont été placés suivant les recommandations de la Société Internationale de Biomécanique (ISB)³⁰ par une même personne, ils sont placés directement sur la peau de l'enfant (figure 1)

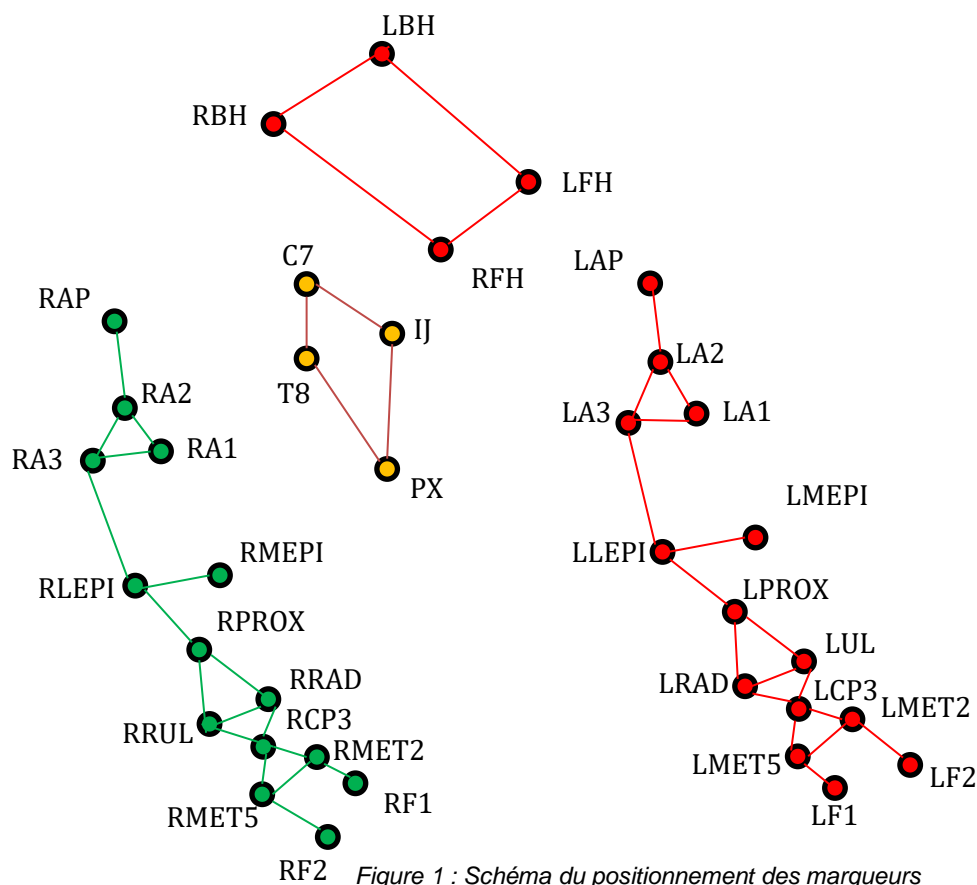


Figure 1 : Schéma du positionnement des marqueurs

L'enfant est assis sur une chaise trip trap. La hauteur de la table doit être réglée afin que les 2 coudes, hanches, genoux et pieds soient fléchis à 90°.

La position de départ est normalisée : l'épaule doit être en adduction au tronc avec le bras vertical, le coude en flexion à 90°, l'avant-bras en pronation, le poignet en position neutre avec centre articulaire aligné avec le bord de la table, le poing reste fermé et est posé sur la table. L'emplacement de la main au départ doit toujours être le même pour chaque essai. Un autocollant est placé sur la table afin d'indiquer la position de départ de la main pour qu'elle soit identique à chaque essai. 2 tâches unilatérales sont réalisées.

Le matériel utilisé est un buzzer d'une dimension de 9cm de diamètre et 3cm de hauteur.

La longueur de bras de l'enfant (distance entre le processus acromial et l'articulation interphalangienne proximale du 2ème doigt lorsque le poing est fermé) a été mesurée afin d'adapter son placement aux mesures anthropométriques de l'enfant.

Le buzzer est placé sur la table, sur l'axe médian de l'enfant à 60% de la longueur de bras de l'enfant.

Les tâches réalisées sont les suivantes :

- Atteindre Buzzer dominant : L'enfant atteint le buzzer avec sa main dominante.
- Atteindre Buzzer non dominant : L'enfant atteint le buzzer avec sa main non dominante

Il s'agit de tâches unilatérales : le MS controlatéral ne doit pas bouger.

Une fois que l'objet est touché l'enfant revient à sa position de départ pour préparer le prochain essai.



Figure 2 : Position de l'enfant

Le praticien se trouve devant l'enfant et le guide dans la tâche à effectuer, notamment pour lui dire quelle main doit être active. Il ne doit pas toucher la main de l'enfant lors de l'acquisition. Il doit se mettre en position accroupie et sous la table afin de ne pas obstruer la vision des caméras.

Une autre personne peut se trouver derrière l'enfant afin de contrôler sa position et assurer son adhésion au jeu.

3. Data Processing

Pré traitement

1. Critères d'inclusion/d'exclusion des essais dans l'analyse

La visualisation des vidéos a permis de s'assurer de la standardisation des mesures lors des deux évaluations. Un essai est inclus dans l'analyse si le protocole est respecté (pas de stimuli sonore ou visuel autre que le jeu, respect du jeu et de sa position, respect de la position de l'enfant ainsi que de la position de sa main lors du départ)

Trois positions de la main de l'enfant lors du départ ont été observées lors des essais :

- La main est placée comme indiquée dans le protocole, le centre articulaire du poignet est aligné avec le bord de la table
- La moitié de l'avant-bras est posé sur la table
- La totalité de l'avant-bras est posé sur la table, le centre articulaire du coude est aligné avec le bord de la table.

Il a été décidé d'inclure dans l'analyse les 2 premières conditions afin d'inclure le maximum d'enfants dans notre analyse.

Compte tenu de l'atteinte bilatérale des enfants inclus, une tenue du tronc a été nécessaire pour certains enfants. Si la tenue du tronc est différente entre J0 et J90, l'enfant est exclu de l'analyse statistique.

Les essais où le praticien touche la main de l'enfant lors de l'acquisition ou lorsque la tâche n'a pas été complètement accomplie ne sont également pas pris en compte.

Concernant la qualité des données, des critères d'inclusion ont été définis suite à la visualisation des fichiers c3d. Un essai est inclus dans l'analyse lorsque :

- le modèle de positionnement des marqueurs est respecté
- tous les marqueurs (à l'exception de la tête) apparaissent au moins à une image dans le fichier c3d.
- le marqueur CP3 est présent tout du long de l'acquisition
- pour l'analyse des paramètres cinématiques tous les marqueurs doivent être présents, avec un pourcentage de présence de l'ensemble des marqueurs avant reconstruction d'au moins 80%
- pour l'analyse des PST seul le marqueur CP3 doit être présent

Un enfant est inclus dans l'analyse s'il possède pour chaque session une acquisition statique où tous les marqueurs sont présents ainsi que 2 essais par tâche respectant les critères énoncés ci-dessus.

2. Reconstruction et filtrage

La reconstruction des marqueurs manquants s'est faite à partir d'interpolation linéaire, polynomiale et de source proposée par le logiciel Vicon Nexus. Dans le cas de marqueurs absents en début ou en fin d'acquisition la méthode proposée par Soderkvist³¹ a été utilisée.

Les trajectoires ont été filtrées avec un filtre de Butterworth d'ordre 2 sans déphasage et avec une fréquence de coupure de à 6Hz.

Cette reconstruction a été réalisée sur Python, en utilisant les librairies : Numpy, Matplotlib, Pandas, Seaborn, Scipy, Btk, Xrwt, Xlwt, Xlrd, Time, Os, Shutill, Glob.

3. Début et fin de mouvement

Le début du mouvement est défini dès que l'enfant bouge sa main.

La fin du mouvement est définie dès le premier contact de la main ou des doigts de l'enfant avec le buzzer.

Le début et la fin de chaque essai ont été déterminés visuellement dans un but de validation d'un algorithme de détermination de début et de fin du mouvement de façon automatisée.

Ce caractère automatique est intéressant pour 2 raisons : son objectivité et sa rapidité. Mais la complexité réside dans son efficience, le mouvement humain étant par définition naturel, il est donc caractérisé par une multitude de paramètres (vitesse, accélération, cinétique angulaire, fluidité, rectitude etc.). Ainsi, tout le défi de la décision du départ et de l'arrêt du mouvement réside dans la détermination des paramètres prépondérants dans la caractérisation du mouvement. Par ailleurs, ces paramètres sont fortement dépendants du type de mouvement. La littérature se concentre principalement sur des méthodes de seuillage de vitesse (tableau 5).

	Population	Tâche	Début/Fin
Hung 2011	Nombre d'enfants : 20 enfants avec PC Age moyen : 6,9 ans Ecart-type : 2 ans	Tâche bilatérale d'ouverture d'un tiroir et de manipulation d'un objet à l'intérieur	Début : poignet atteint une vitesse tangentielle de 2cm/s Fin : la vitesse tangentielle du poignet passe en dessous de 2cm/s
Babinsky 2012	Nombre d'enfants : 19 enfants DT Age moyen : 4.8 ans Intervalle : 4 à 5.7 ans	Attraper un objet	Début : première frame pour laquelle la main bouge à une vitesse supérieure de 50 mm/s pendant plus de 3 frame consécutives Fin : première frame pour laquelle la main bouge à une vitesse inférieure à 50 mm/s
Camerota 2013	Nombre d'enfants : 1 avec PC Age : 17 ans	Atteindre un objet	Début : dépasse 10% de la vitesse max Fin : inférieur à 10% de la vitesse max
Sanlund 2013	Nombre d'enfants : 15 enfants avec PC Age moyen : 11 ans Intervalle : 6 à 16 ans	Atteindre un objet	Début : vitesse supérieure à 0.3 m/s dans la direction verticale et le reste pendant au moins 145 ms Fin : la main atteint sa position la plus haute

Tableau 5 : Tableau non exhaustif des débuts et fins de mouvement dans la littérature

Dans cette étude, seul le marqueur placé sur le dos de la main (CP3) a été utilisé pour la définition du début et de la fin du mouvement car il est celui qui était le plus présent lors des acquisitions.

Dans le cadre de notre étude comparative des méthodes de détermination du début et de la fin du mouvement nous nous sommes concentrés sur des seuils en relatif pouvant tenir compte de la grande variabilité de mouvement de la population. Afin de déterminer le début de l'essai, trois méthodes ont été testées :

- Début défini par 1 condition : vitesse

Le début est défini avec une méthode de seuillage classique : la première image pour laquelle la norme de la vitesse dépasse 8% de la vitesse maximale.

Ce pourcentage a été déterminé lors du traitement des données du 1^{er} RCT. Ce seuil a été déterminé chez 5 enfants avec PC unilatérale, il s'agit de la valeur qui permettait de s'approcher le plus des valeurs déterminées visuellement.

- Début combinant 2 conditions : vitesse et altitude

Le début est défini avec une méthode de seuillage classique et une condition sur l'altitude : la première image pour laquelle la norme de la vitesse dépasse 8% de la vitesse maximale si l'altitude est inférieure à 10% de l'altitude maximale.

- Début défini par 1 condition courbure

Le début est défini avec la méthode de courbure, c'est-à-dire l'indice du maximum de la courbe de l'altitude entre le début de l'acquisition et l'indice du maximum de l'altitude.
(pour plus de détails sur la courbure, se référer à la partie stop p17).

Afin de déterminer la fin de l'essai, deux méthodes ont été testées :

- Fin définie par 1 condition : vitesse

La fin est définie avec une méthode de seuillage classique : la première image pour laquelle la norme de la vitesse est inférieure à un pourcentage de la vitesse maximale.

Ce seuil a été déterminé à travers une comparaison d'efficacité pour des seuils compris entre 6 et 20%.

- Fin définie par 1 condition : courbure

Après analyse de la trajectoire suivant l'axe Z, il s'est avéré l'existence d'une courbure importante pouvant caractériser la fin du mouvement. Celui-ci apparaît après le maximum de la courbe suivant Z.

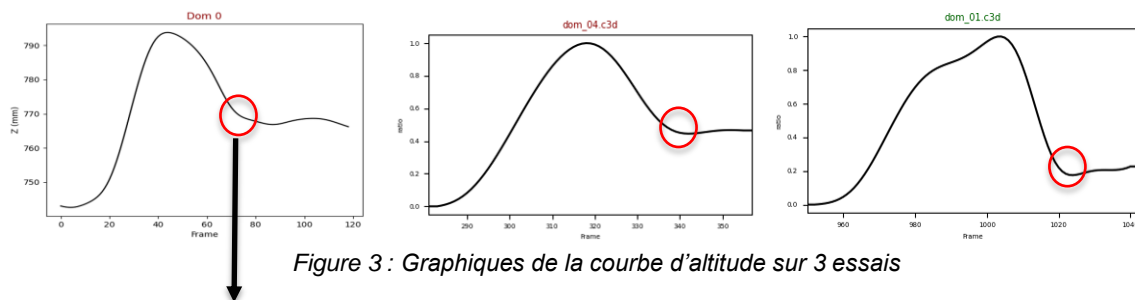


Figure 3 : Graphiques de la courbe d'altitude sur 3 essais

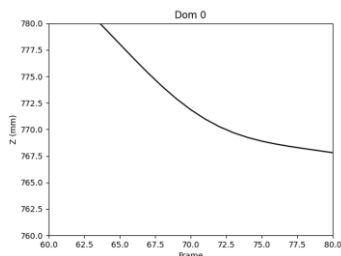


Figure 4 : Graphique de la courbe d'altitude de Dom 0

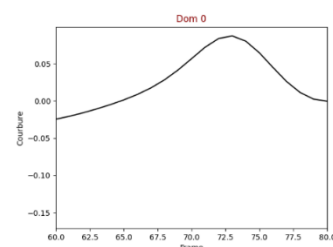
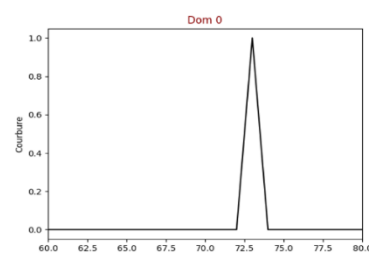


Figure 5 : Graphiques de la courbure de Dom 0



Figure 6 : Pic de la courbure de Dom 0



La courbure se définit par l'équation suivante :

$$y = f_2 * (1 + f_1^2)^{-1,5}$$

$$f_1 = grad(X)$$

$$f_2 = grad^2(X)$$

La fin du mouvement est définie comme : l'indice du maximum de courbure de l'altitude (3) arrivant après l'indice du maximum d'altitude et avant l'indice du maximum de courbure de la vitesse (2). Néanmoins, si l'indice du maximum de la courbure de l'altitude arrivant après l'indice du maximum de courbure de la vitesse (4) est deux fois supérieur à la valeur trouvée précédemment (5) alors c'est cette nouvelle valeur qui définit la fin du mouvement.

$$\left\{ \begin{array}{l} .f: x \rightarrow f_2(x) * (1 + f_1^2(x))^{-1,5} \quad (1) \\ .Cv_{max} = f(v(i)) \quad i \in [i_{z_{max}}, i_{end}] \quad (2) \\ .Cz_{max0} = f(z(i)) \quad i \in [i_{z_{max}}, i_{cv_{max}}] \quad (3) \\ .Cz_{max1} = f(z(i)) \quad i \in [i_{cv_{max}}, i_{end}] \quad (4) \\ .Cz = \max(2 * Cz_{max0}, .Cz_{max1}) \quad (5) \\ .fin \text{ du mouvement} = i_{Cz} \quad (6) \end{array} \right\}$$

Une analyse comparative des valeurs manuelles et automatiques de début et fin des essais a été faite en calculant un pourcentage d'erreur relative.

$$\text{Pourcentage d'erreur relatif début : } r_{début} = \frac{|début_{auto} - début_{manuel}|}{fin_{manuelle} - début_{manuel}}$$

$$\text{Pourcentage d'erreur relatif fin : } r_{fin} = \frac{|fin_{auto} - fin_{manuel}|}{fin_{manuelle} - début_{manuel}}$$

A partir de l'ensemble des acquisitions, pour chaque méthode de début et de fin de mouvement, le pourcentage d'acquisitions avec un ratio d'erreur supérieur à 10%, la moyenne du pourcentage d'erreur relatif de toutes les acquisitions confondues, la moyenne du pourcentage d'erreur relatif des acquisitions avec un ratio d'erreur inférieur à 10% ont été déterminés.

Traitement

1. Description des paramètres spatio-temporels et de qualité de trajectoire

Le calcul des paramètres spatio-temporels se fait à partir de la position 3D du marqueur CP3, RCP3 pour le MS droit et LCP3 pour le MS gauche.

Les paramètres suivants ont été calculés : durée du mouvement, TP, vitesse moyenne, vitesse maximale, UM, UMT, RV, NP0, DLJ, LDLJ, SPARC, IC. Leur calcul est décrit dans l'annexe 1 et ils ont été étudiés dans l'introduction.

2. Cinématique angulaire : description du modèle cinématique

Le modèle cinématique des MS représente 4 solides rigides : le tronc, le bras, l'avant-bras, la main.

Ces segments sont reliés par une liaison rotule comportant 3 degrés de liberté en rotation permettant un mouvement dans les 3 plans : sagittal, frontal et transversal.

Chaque segment corporel est défini par un repère local défini par 3 points correspondants à un marqueur réel ou virtuel (centre de 2 marqueurs par exemple), la cinématique de chaque articulation a été calculée en utilisant la séquence d'Euler ZXY où Z représente la flexion/extension, X l'abduction/adduction et Y la rotation interne/externe. Le mouvement du tronc est défini dans le repère lié au laboratoire. Le mouvement de l'épaule (respectivement du coude, du poignet) est défini comme le mouvement du repère lié au bras (respectivement à l'avant-bras, à la main) par rapport au repère lié au tronc (respectivement au bras et à l'avant-bras). Les repères ont été définis comme décrits dans les tableaux suivants en respectant les recommandations fournies par l'ISB³¹. Le logiciel Procalc (VICON Motion System Ltd, Oxford, UK) a été utilisé pour générer les repères et les angles d'Euler. Le modèle est explicité dans l'annexe 2.

Critère de jugement principal

Le critère de jugement principal de cette étude est l'évolution de l'indice de fluidité SPARC³³ entre J0 et J90 pour le groupe HABIT-ILE en comparaison avec le groupe CONV. Cette mesure rassemble l'ensemble des conditions nécessaires à une mesure de fluidité robuste : sans dimension, réponse monotone, sensible aux changements de mouvement, robuste au bruit. Elle a une complexité algorithmique importante, cet inconvénient n'est pas excluant car notre base de données pour l'analyse est relativement petite (~10Mo). L'utilisation de cette métrique, bien que récente (développée en 2012) se répand dans les articles scientifiques traitant de l'évaluation de thérapie pédiatrique pour des enfants avec PC^{34,35}.

Plus la valeur est négative et moins le mouvement est fluide.

Population	Age	Atteinte	SPARC DT	SPARC PC	Articles
39 enfants - 20 DT, 19 PCu	6-17 ans	Unilatéral	-1,46	-1,55	Cacioppo et al. 2020

Tableau 6 : tableau récapitulation des résultats de Cacioppo et al. 2020³³

Critère de jugement secondaire

Les critères de jugements secondaires sont les changements de l'efficacité de la trajectoire des paramètres spatio-temporels (durée, vitesse moyenne, maximale, TP), des indices de fluidité (NNP0, RV, LDLJ, DLJ, Um), de rectitude (IR), et des paramètres de cinématiques (WAVE, ROM) entre J0 et J90 pour le groupe HABIT-ILE en comparaison avec le groupe CONV.

4. Analyse statistique

Une analyse statistique a été réalisée sur les caractéristiques démographiques et cliniques de la population (l'âge, le genre, la latéralité de l'atteinte, l'étiologie) afin de déterminer si les groupes CONV et HABIT-ILE étaient significativement différents.

Pour le traitement biomécanique de chaque enfant, les valeurs aberrantes obtenues lors des essais n'ont pas été incluses dans l'analyse statistique.

Les valeurs aberrantes des paramètres spatio-temporels et de qualité du mouvement sont définies à partir des quartiles.

La limite basse est égale à $Q1 - (1.5 * IQR)$

La limite haute est égale à $Q3 + (1.5 * IQR)$

$IQR = Q3 - Q1$ avec Q1 étant le 1^{er} quartile et Q3 étant le 3^{ème} quartile.

Les valeurs aberrantes des paramètres cinématiques sont définies à partir de l'article de Sangeux³². Le calcul du score de chaque essai prend en compte l'ensemble des paramètres cinématique.

Le traitement de chaque enfant est en cours. Pour tous les enfants la moyenne des essais pour chaque paramètre PST et cinématique sera calculé à J0, J90 pour les membres dominants et non dominants.

B. Résultats

1. Etude de flux

Deux types d'études ont été conduits en parallèle : l'étude des PST et de la qualité du mouvement, et l'étude de la cinématique. Effectivement, le calcul de ce dernier nécessite que tous les marqueurs soient reconstruits alors que le calcul des PST et de la qualité du mouvement ne nécessite la présence que d'un marqueur. Le nombre d'enfants inclus dans chaque analyse sera donc différent.

Les données du centre de Pise n'ont pas pu être inclus dans ce rapport. Elles ont été acquises avec un système BTS, et nécessitent un traitement du centre de Pise avant que nous puissions les traiter. La suite des résultats inclut les données de Bruxelles, Brest et Nantes

Au début de cette étude, 52 enfants ont été inclus, ils ont ensuite été séparés dans 2 groupes de manière aléatoire et équilibrée.

Pour le groupe CONV, 5 enfants n'ont pas été évalués à J0, 3 ne l'ont pas été à J90, et pour 3 autres enfants les critères d'inclusion dans l'analyse n'ont pas été respectés. De plus, pour 6 enfants, la qualité du fichier c3d n'a pas été suffisante pour le calcul de la cinématique sur ces données. 15 enfants peuvent être donc comparés entre J0 et J90 pour les PST et de qualité. La cinématique de 9 enfants pourra être comparée entre J0 et J90 (cf Annexe 2 Diagramme de flux)

Pour le groupe HABIT-ILE, 5 enfants n'ont pas été évalués à J0, 1 ne l'a pas été à J90, et pour 5 autres enfants, les critères d'inclusion dans l'analyse n'ont pas été respectés. De plus, pour 4 enfants la qualité du fichier c3d n'a pas été suffisante pour le calcul de la cinématique sur ces données. 15 enfants seront comparés entre J0 et J90 pour les paramètres PST et de qualité tandis que 11 enfants seront comparés entre J0 et J90 pour la cinématique. (cf Annexe 2 Diagramme de flux)

2. Caractéristiques démographiques et cliniques des sujets

Les enfants du groupe CONV inclus dans l'analyse comparative des paramètres spatio-temporels et de qualité ont un âge moyen de 41 mois avec un écart-type de 9 mois. Ceux du groupe HABIT-ILE ont un âge moyen de 43 mois avec un écart-type de 9 mois. L'âge suit une distribution normale ; un test de Student a donc été réalisé. La différence de l'âge entre ces deux groupes n'est pas statistiquement significative ($p\text{-value}=0.425$) (tableau 7).

Le genre, l'étiologie, la latéralité de l'atteinte ainsi que la GMFCS ont été comparés grâce un test de χ^2 .

Il n'y a aucune différence significative entre les 2 groupes excepté pour la latéralité de l'atteinte (tableau 7).

	CONV (n=15)	HABIT-ILE (n=15)	p
Caractéristiques démographique			
Age (mois)	41±9	43±8	0.425 ^a
Genre	F(7), M(8)	F(6), M(9)	0.71 ^b
Etiologie	PREMATURITE (9), ASPHYXIE PERINATALE(5), ENCEPHALITE(1)	PREMATURITE (7), ASPHYXIE PERINATALE(7), ENCEPHALITE(1)	0.74 ^b
Côté le plus affecté	D(12),G(3)	D(6), G(9)	0.025 ^b
Caractéristiques clinique			
Score GMFCS	I(2), II(7), III(5), IV(1)	I(1), II(3), III(8), IV(3)	0.36 ^b

Tableau 7 : Description de la population pour l'analyse des PST et des paramètres de qualité
Les résultats sont exprimés en nombre, pour l'âge ils sont exprimés en moyenne \pm écart-type
F : Féminin, M : Masculin, G : Gauche, D : Droite, ^a Test de Student, ^b Test Chi²

Les enfants du groupe CONV inclus dans l'analyse comparative de la cinématique ont un âge moyen de 39 mois avec un écart-type de 9 mois. Ceux du groupe HABIT-ILE ont un âge moyen de 44 mois avec un écart-type de 9 mois L'âge suit une distribution normale ; un test de Student a donc été réalisé. La différence de l'âge entre ces deux groupes n'est pas statistiquement significative (p-value=0.39) (tableau 8).

Le genre, l'étiologie, la latéralité de l'atteinte ainsi que la GMFCS ont été comparés grâce un test de Chi².

Il n'y a aucune différence significative entre les 2 groupes excepté pour la latéralité de l'atteinte (tableau 8).

	CONV (n=11)	HABIT-ILE (n=9)	p
Caractéristiques démographique			
Age (mois)	39±9	44±9	0.39 ^a
Genre	F(5), M(6)	F (1), M(8)	0.095 ^b
Etiologie	PREMATURITE(8), ASPHYXIE PERINATALE(3), ENCEPHALITE(0)	PREMATURITE(4), ASPHYXIE PERINATALE(5), ENCEPHALITE(0)	0.20 ^b
Côté le plus affecté	G(9), D(2)	G(3), D(6)	0.06 ^b
Caractéristiques clinique			
Score GMFCS	I(1), II(6), III(4), IV(0)	I(1), II(1), III(5), IV(1)	0.23 ^b

Tableau 8 : Tableau de description de la population pour l'analyse des paramètres de cinématique
Les résultats sont exprimés en nombre, pour l'âge ils sont exprimés en moyenne \pm écart-type
F : Féminin, M : Masculin, G : Gauche, D : Droite, ^a Test de Student, ^b Test Chi²

3. Début et fin du mouvement

Pour le début du mouvement, le seuil le plus efficace avait été déterminé précédemment lors d'une étude menée sur 5 enfants du RCT1. Pour la fin du mouvement, aucune étude n'avait été menée, une comparaison d'efficacité pour différentes valeurs de seuil a été réalisée : les pourcentages de vitesse maximale ont été variés afin de déterminer celui qui donnerait la moyenne de pourcentage d'erreur relatif la plus faible (tableau 9).

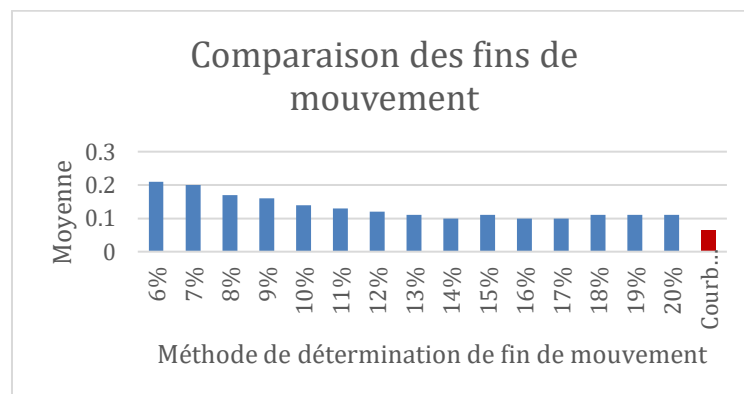


Figure 9 : Tableau de comparaison entre différentes méthodes de détermination de fin du mouvement basé sur les moyennes des ratios d'erreurs
En abscisse les pourcentages correspondent aux seuils des V_{max}

Pour la fin du mouvement, les seuils les plus efficaces sont respectivement ceux de 14, 16 et 17%. La valeur de 14% sera donc utilisée.

	Début			Fin	
	Seuil sur la vitesse de 8% de la V_{max}	Seuil à 8% de la V_{max} condition sur le seuil à 10% de Z_{max}	Courbure	Seuil sur la vitesse de 14% de la V_{max}	Courbure
Pourcentage d'acquisitions avec un ratio d'erreur > 10%	22%	33%	70%	22%	13%
Moyenne ratio d'erreur de toutes les acquisitions confondues	0.093	0.14	0.41	0.11	0.065
Moyenne ratio d'erreur sans les acquisitions avec un ratio d'erreur > 10%	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03

Tableau 9 : Tableau de comparaison entre différentes méthodes de détermination de début et fin du mouvement
 V_{max} : Vitesse maximale, Z_{max} : Altitude maximale
Ratio d'erreur : différence en absolu de la fin automatique et manuelle sur la durée manuelle du mouvement

Pour le début du mouvement, la méthode de seuillage sur la vitesse sans condition est la plus efficace, avec 76 fichiers ayant un ratio d'erreur supérieur à 10%, cela représente 22% de l'ensemble des fichiers (353) qui ne sont pas considérés comme étant annotés correctement.

La moyenne du ratio d'erreur de la détermination du Start sans les fichiers avec un pourcentage d'erreur supérieur à 10% est de 4% ce qui semble tout à fait satisfaisant. La méthode de courbure détaillée dans la partie A.3 donne une moyenne du ratio d'erreur pour le start à 41%, ce qui est bien au-delà de l'acceptable et qui nous montre que la méthode de courbure n'est pas généralisable à la détermination du début du mouvement.

Pour la fin du mouvement, la méthode de courbure est la plus efficace, avec uniquement 13% des essais avec un pourcentage d'erreur supérieur à 10% contre 22% pour la méthode de seuillage sur la vitesse.

La moyenne du ratio d'erreur de la détermination du début sans les fichiers avec un pourcentage d'erreur supérieur à 10% est de 3% ce qui semble tout à fait satisfaisant.

4. Description cinématique du geste 'Atteindre le Buzzer'

Nous nous intéressons aux mouvements de l'enfant 02.11.02.

Comme on peut le voir sur la figure ci-dessous, le mouvement de toucher le buzzer se traduit généralement par une flexion suivie d'une extension de l'épaule. Ici, l'enfant effectue une abduction suivie d'une adduction de l'épaule.

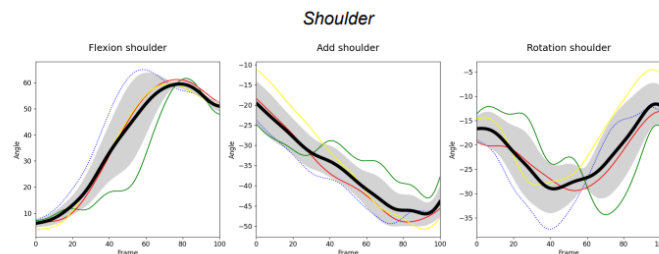


Figure 10 : Cinématique de l'épaule à J90 pour le MS non dominant

L'articulation du coude ne possède que 2 degrés de liberté permettant les mouvements de flexion-extension et de prono-supination. Les mouvements d'adduction et d'abduction ne seront donc pas commentés.

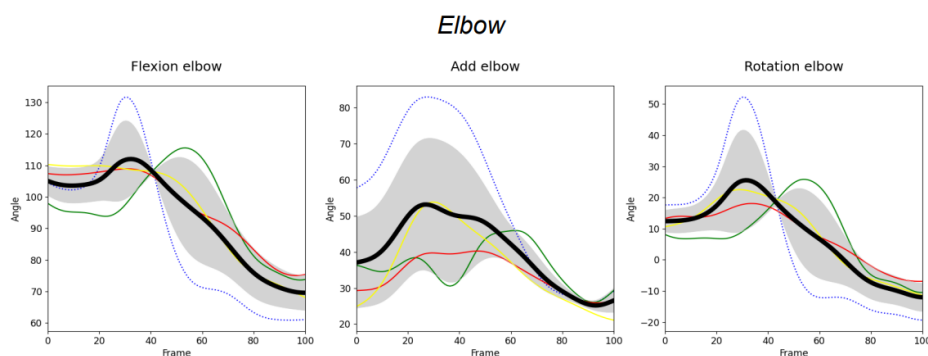


Figure 11 : Cinématique du coude à J0 pour le MS non dominant

Afin d'aller toucher le buzzer, cet enfant réalise une légère flexion suivie d'une extension de coude et une pronation (rotation externe) suivie d'une supination (rotation interne).

5. Analyse des résultats sur un sujet CONV et un sujet HABIT-ILE

L'analyse statistique n'a pas encore été conduit sur l'ensemble des enfants. Un rapport pour chaque enfant (Annexe 4 et 5) a été produit et les résultats de 2 enfants sont discutés ci-dessous :

Groupe CONV

Enfant 02.11.02 (Voir Annexe 4)

Pour le MS dominant, la durée du mouvement et le TP ne semblent pas évoluer entre J0 et J90. Pour le MS non dominant, la durée du mouvement semble diminuée légèrement (amélioration) et le TP augmente légèrement (détérioration). Pour les deux membres les vitesses moyennes et maximales diminuent (détérioration). Les valeurs des PST semblent peu varier entre J0 et J90.

Pour les deux MS, l'UMT baisse légèrement (MS dominant : $0.19 \pm 0.13 \rightarrow 0.05 \pm 0.02$, MS non dominant : $0.33 \pm 0.13 \rightarrow 0.25 \pm 0.06$), ce qui pourrait indiquer une faible détérioration de la fluidité.

Mais globalement pour le MS dominant et le MS non dominant, les autres valeurs des paramètres de fluidité sont très similaires à J0 et J90, ce qui semble indiquer une stagnation dans la fluidité.

Pour le MS dominant et le MS non dominant, la rectitude est très similaire à J0 et J90, ce qui semble indiquer une stagnation dans la l'efficacité du mouvement.

Pour les deux MS la flexion maximale du tronc est globalement la même, les ROM en flexion/extension de l'épaule et du coude sont aussi proches, avec une diminution ($61^\circ \pm 2^\circ \rightarrow 40^\circ \pm 3^\circ$) de l'extension maximale de l'épaule pour le MS non dominant et une diminution de la supination maximale du coude pour les 2MS (détérioration). La ROM du poignet a augmenté ($7^\circ \pm 6^\circ \rightarrow 44^\circ \pm 9^\circ$) pour le MS non dominant (amélioration).

Que ce soit pour les PST, les paramètres de qualité, de fluidité et de cinématique il semble y avoir peu de variations entre J0 et J90 pour le deux MS. Cela semble concorder avec le fait que l'enfant 02.11.02 fasse partie du groupe CONV et que l'évolution de son mouvement évolue peu en 3 mois.

Groupe HABIT ILE

Enfant 01.10.01 Voir Annexe 5)

Pour le MS dominant, la durée du mouvement augmente ($0.55s \pm 0.1 \rightarrow 0.81s \pm 0.37$), ce qui pourrait indiquer une détérioration du mouvement. Le TP augmente aussi ($0.5s \pm 0.05 \rightarrow 0.85s \pm 0.09$) ce qui pourrait indiquer une amélioration du mouvement. La vitesse moyenne et la vitesse maximale augmentent (amélioration).

Pour le MS non dominant, le TP diminue ($0.81s \pm 0.08 \rightarrow 0.55s \pm 0.32$) ce qui pourrait indiquer une amélioration. Mais la durée augmente, les vitesses moyennes et maximales diminuent ce qui indiquerait plus une détérioration du mouvement.

Pour les deux MS, l'UM et le NP0 augmentent (détérioration), l'UM et le RV diminuent (détérioration), le DLJ, le LDLJ, le SPARC diminuent de manière importante (détérioration). L'ensemble des résultats des paramètres de fluidité se détériorent entre J0 et J90 pour les deux MS, ce qui semble indiquer une baisse de la fluidité après la thérapie HABIT-ILE.

Pour le MS dominant, l'IC augmente entre J0 et J90 ($1.28 \pm 0.1 \rightarrow 1.92 \pm 0.51$), ce qui semble indiquer une diminution de la rectitude. Pour le MS non dominant l'IC diminue entre J0 et J90 ($1.88 \pm 0.32 \rightarrow 1.54 \pm 0.17$), ce qui semble indiquer une augmentation de la rectitude.

Pour les deux MS, la flexion maximale du tronc est plus importante à J90 (détérioration), les ROM en flexion/extension de l'épaule et du coude ont augmenté (amélioration), avec une augmentation de l'extension maximale de l'épaule (amélioration), une diminution de l'abduction maximale de l'épaule (détérioration), de l'extension maximale du coude (amélioration), de la supination maximale du coude (amélioration). Le ROM du poignet a peu changé. L'ensemble de ces variations ne semblent pas indiquer d'améliorations générales.

Pour les PST, aucune conclusion de la variation des paramètres ne peut être faite.

Les paramètres de qualité et de fluidité semblent se détériorer entre J0 et J90 pour les deux MS. La rectitude semble être améliorée pour le MS dominant et détériorée pour le MS non dominant.

Les paramètres de cinématique ne semblent pas indiquer de tendance particulière.

C. Discussion

Cette étude est la première à évaluer l'effet de la thérapie HABIT-ILE sur le mouvement des MS chez des enfants d'âge préscolaire atteints de PCbi. L'analyse quantifiée du mouvement permet d'étudier les changements concernant les paramètres spatio-temporels, la qualité du mouvement et la cinématique angulaire.

Une nouvelle méthode de détermination de fin de mouvement a été présentée. Elle se base sur le calcul de la courbure de l'altitude et de la vitesse du marqueur CP3. Le programme développé a été comparé à la méthode la plus répandue dans la littérature, la détermination de fin de mouvement par seuillage. Le pourcentage relatif d'erreur en comparaison avec une annotation manuelle de la fin de mouvement est près de deux fois plus faible avec notre méthode (13% au lieu de 22%). Ce nouvel outil semble être fortement dépendant de la tâche à effectuer, ici il est efficace pour 'Atteindre Buzzer'.

Concernant la méthode de détermination du début de mouvement, le seuil a été déterminé au préalable lors du 1^{er} RCT. L'échantillon de données qui a été utilisé pour déterminer cette valeur est différent de celui utilisé dans notre cas. Il serait donc intéressant de déterminer le seuil le plus efficace comme cela a été fait avec la fin du mouvement, ce qui pourrait permettre de réduire la marge d'erreur de l'algorithme développé.

L'analyse des résultats sur deux enfants, l'un appartenant au groupe CONV, l'autre au groupe HABIT-ILE ne semble pas indiquer pour l'instant d'amélioration notable du mouvement que ce soit pour les PST, les paramètres de qualité et de cinématique

Aucune analyse statistique n'a été menée sur ces 2 enfants, l'analyse a été seulement qualitative dans le but de ce rapport de stage afin d'observer si une tendance sortait, elle permet à l'échelle de l'individu de comprendre les évolutions et d'émettre des hypothèses quant à l'amélioration de son mouvement.

Il n'y a dans ce projet aucune mesure conduite chez une groupe d'enfant avec un développement typique en âge préscolaire sur une tâche similaire. Les hypothèses d'amélioration des paramètres ont été basées sur la littérature comparant les populations PC et TD d'âge scolaire.

L'étude de comparaison entre J0 et J90 sur l'ensemble de l'échantillon incluant le centre de Pise permettra de répondre aussi à la question. Cependant le faible nombre d'enfants impliquerait une puissance statistique faible et seule une tendance pourrait être évoquée. Certains biais seront à prendre en compte dans l'analyse des résultats :

- Le projet est multicentrique. Afin d'inclure le maximum d'enfants possible pour augmenter la puissance statistique de notre étude, certaines déviations du protocole initial ont dû être acceptées (par ex. sur la position de départ).
- L'erreur de mesure n'a pas été calculée dans une étude de reproductibilité inter session. Ainsi les modifications observées pourraient être dues à une erreur de mesure.

- Les 2 tâches étudiées dans ce rapport sont des tâches simples d'atteinte pour toucher et ne permettent pas d'investiguer tous les degrés de liberté des articulations comme l'ouverture de la main par exemple. En effet, lors des stages HABIT-ILE des composantes du mouvement tels que l'ouverture de la main ou la supination sont très entraînées car elles sont nécessaires à la réalisation des objectifs fonctionnels fixés en début de stage. Deux tâches bimanuelles ont été réalisées durant ce protocole : une tâche bimanuelle de saisie d'un objet et une tâche d'ouverture bimanuelle d'un tiroir.

Perspectives :

Ce rapport intermédiaire de stage permet de rendre compte de l'évolution du projet du master 2. Les 2 derniers mois de stage seront consacrés à :

- Le pré traitement des données de Pise afin d'augmenter le nombre d'enfants inclus dans l'analyse
- L'analyse statistique sur l'ensemble des données.
- L'amélioration de la détermination du début de l'essai en faisant varier le pourcentage de vitesse et d'altitude afin d'améliorer la précision de l'algorithme en diminuant le pourcentage d'erreur relative.
- L'adaptation de l'algorithme de traitement pour des tâches bimanuelles du protocole non décrites dans ce mémoire.
- L'optimisation des algorithmes de traitement et d'analyse afin d'avoir un gain de temps

Références

- ¹ Rosenbaum P, Paneth N, Leviton A, Goldstein M, Bax M, Damiano D, Dan B, Jacobsson B. A report: the definition and classification of cerebral palsy April 2006. *Dev Med Child Neurol Suppl.* 2007 Feb;109:8-14. Erratum in: *Dev Med Child Neurol.* 2007 Jun;49(6):480. PMID: 17370477.
- ² Graham, H. Kerr, Peter Rosenbaum, Nigel Paneth, Bernard Dan, Jean-Pierre Lin, Diane L. Damiano, Jules G. Becher, et al. « Cerebral Palsy ». *Nature Reviews Disease Primers* 2, n° 1 (22 décembre 2016): 15082. <https://doi.org/10.1038/nrdp.2015.82>.
- ³ Marwaha, Mohita, Kalpana Bansal, Nidhi Sehwat, et Radhika Chopra. « Cerebral Palsy: A Dental Update ». *International Journal of Clinical Pediatric Dentistry* 7, n° 2 (août 2014): 109-18. <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10005-1247>.
- ⁴ Weierink, Lonneke, R. Jeroen Vermeulen, et Roslyn N. Boyd. « Brain Structure and Executive Functions in Children with Cerebral Palsy: A Systematic Review ». *Research in Developmental Disabilities* 34, n° 5 (mai 2013): 1678-88. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2013.01.035>.
- ⁵ Graaf-Peters, Victorine B. de, et Mijna Hadders-Algra. « Ontogeny of the Human Central Nervous System: What Is Happening When? » *Early Human Development* 82, n° 4 (avril 2006): 257-66. <https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2005.10.013>.
- ⁶ Stiles, Joan, et Terry L. Jernigan. « The Basics of Brain Development ». *Neuropsychology Review* 20, n° 4 (décembre 2010): 327-48. <https://doi.org/10.1007/s11065-010-9148-4>.
- ⁷ Brizzolara et al., 2002
- ⁸ Reid, Lee B., Stephen E. Rose, et Roslyn N. Boyd. « Rehabilitation and Neuroplasticity in Children with Unilateral Cerebral Palsy ». *Nature Reviews Neurology* 11, n° 7 (juillet 2015): 390-400. <https://doi.org/10.1038/nrneurol.2015.97>.
- ⁹ Morgan, Catherine, Johanna Darrah, Andrew M Gordon, Regina Harbourne, Alicia Spittle, Robert Johnson, et Linda Fethers. « Effectiveness of Motor Interventions in Infants with Cerebral Palsy: A Systematic Review ». *Developmental Medicine & Child Neurology* 58, n° 9 (septembre 2016): 900-909. <https://doi.org/10.1111/dmcn.13105>.
- ¹⁰ Novak, Iona, Catherine Morgan, Michael Fahey, Megan Finch-Edmondson, Claire Galea, Ashleigh Hines, Katherine Langdon, et al. « State of the Evidence Traffic Lights 2019: Systematic Review of Interventions for Preventing and Treating Children with Cerebral Palsy ». *Current Neurology and Neuroscience Reports* 20, n° 2 (février 2020): 3. <https://doi.org/10.1007/s11910-020-1022-z>.
- ¹¹ Ferre, Claudio L, Marina Brandão, Bhavini Surana, Ashley P Dew, Noelle G Moreau, et Andrew M Gordon. « Caregiver-Directed Home-Based Intensive Bimanual Training in Young Children with Unilateral Spastic Cerebral Palsy: A Randomized Trial ». *Developmental Medicine & Child Neurology* 59, n° 5 (mai 2017): 497-504. <https://doi.org/10.1111/dmcn.13330>.
- ¹² Jackman, Michelle, Natasha Lannin, Claire Galea, Leanne Sakzewski, Laura Miller, et Iona Novak. « What Is the Threshold Dose of Upper Limb Training for Children with Cerebral Palsy to Improve Function? A Systematic Review ». *Australian Occupational Therapy Journal* 67, n° 3 (juin 2020): 269-80. <https://doi.org/10.1111/1440-1630.12666>.
- ¹³ Hung, Ya-Ching, Claudio L. Ferre, et Andrew M. Gordon. « Improvements in Kinematic Performance After Home-Based Bimanual Intensive Training for Children with Unilateral Cerebral Palsy ». *Physical & Occupational Therapy In Pediatrics* 38, n° 4 (8 août 2018): 370-81. <https://doi.org/10.1080/01942638.2017.1337663>.
- ¹⁴ Morgan, Catherine, Iona Novak, et Nadia Badawi. « Enriched Environments and Motor Outcomes in Cerebral Palsy: Systematic Review and Meta-Analysis ». *Pediatrics* 132, n° 3 (1 septembre 2013): e735-46. <https://doi.org/10.1542/peds.2012-3985>.
- ¹⁵ Charles, Jeanne, et Andrew M Gordon. « Development of Hand-Arm Bimanual Intensive Training (HABIT) for Improving Bimanual Coordination in Children with Hemiplegic Cerebral Palsy ». *Developmental Medicine & Child Neurology* 48, n° 11 (novembre 2006): 931. <https://doi.org/10.1017/S0012162206002039>.
- ¹⁶ Bleyenheuft, Yannick, et Andrew M. Gordon. « Hand-Arm Bimanual Intensive Therapy Including Lower Extremities (HABIT-ILE) for Children with Cerebral Palsy ». *Physical & Occupational Therapy In Pediatrics* 34, n° 4 (novembre 2014): 390-403. <https://doi.org/10.3109/01942638.2014.932884>.
- ¹⁷ Bleyenheuft, Yannick, Daniela Ebner-Karestinos, Bhavini Surana, Julie Paradis, Alexis Sidiropoulos, Anne Renders, Kathleen M Friel, Marina Brandao, Eugene Rameckers, et Andrew M Gordon. « Intensive Upper- and Lower-Extremity Training for Children with Bilateral Cerebral Palsy: A Quasi-Randomized Trial ». *Developmental Medicine & Child Neurology* 59, n° 6 (juin 2017): 625-33. <https://doi.org/10.1111/dmcn.13379>.
- ¹⁸ Rosenbaum, Peter L, Stephen D Walter, Steven E Hanna, Robert J Palisano, Dianne J Russell, Parminder Raina, Ellen Wood, Doreen J Bartlett, et Barbara E Galuppi. « Prognosis for Gross Motor Function in Cerebral Palsy », s. d., 7.
- ¹⁹ Herskind, Anna, Gorm Greisen, et Jens Bo Nielsen. « Early Identification and Intervention in Cerebral Palsy ». *Developmental Medicine & Child Neurology* 57, n° 1 (janvier 2015): 29-36. <https://doi.org/10.1111/dmcn.12531>.
- ²⁰ Morgan, Catherine, Johanna Darrah, Andrew M Gordon, Regina Harbourne, Alicia Spittle, Robert Johnson, et Linda Fethers. « Effectiveness of Motor Interventions in Infants with Cerebral Palsy: A Systematic Review ». *Developmental Medicine & Child Neurology* 58, n° 9 (septembre 2016): 900-909. <https://doi.org/10.1111/dmcn.13105>.

- ²¹Novak, Iona, Cathy Morgan, Lars Adde, James Blackman, Roslyn N. Boyd, Janice Brunstrom-Hernandez, Giovanni Cioni, et al. « Early, Accurate Diagnosis and Early Intervention in Cerebral Palsy: Advances in Diagnosis and Treatment ». *JAMA Pediatrics* 171, n° 9 (1 septembre 2017): 897. <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2017.1689>.
- ²²Hadders-Algra, Mijna, Anke G Boxum, Tjitske Hielkema, et Elisa G Hamer. « Effect of Early Intervention in Infants at Very High Risk of Cerebral Palsy: A Systematic Review ». *Developmental Medicine & Child Neurology* 59, n° 3 (mars 2017): 246-58. <https://doi.org/10.1111/dmcn.13331>.
- ²³Morgan, Catherine, Linda Fethers, Lars Adde, Nadia Badawi, Ada Bancale, Roslyn N. Boyd, Olena Chorna, et al. « Early Intervention for Children Aged 0 to 2 Years With or at High Risk of Cerebral Palsy: International Clinical Practice Guideline Based on Systematic Reviews ». *JAMA Pediatrics* 175, n° 8 (1 août 2021): 846. <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2021.0878>.
- ²⁴Early HABIT-ILE group, R. Araneda, S. V. Sizonenko, C. J. Newman, M. Dinomais, G. Le Gal, E. Nowak, et al. « Functional, Neuroplastic and Biomechanical Changes Induced by Early Hand-Arm Bimanual Intensive Therapy Including Lower Extremities (e-HABIT-ILE) in Pre-School Children with Unilateral Cerebral Palsy: Study Protocol of a Randomized Control Trial ». *BMC Neurology* 20, n° 1 (décembre 2020): 133. <https://doi.org/10.1186/s12883-020-01705-4>.
- ²⁵Sätälä, Heli, Anne Kotamäki, Matti Koivikko, et Ilona Autti-Rämö. « Upper Limb Function after Botulinum Toxin A Treatment in Cerebral Palsy: Two Years Follow-up of Six Cases ». *Pediatric Rehabilitation* 9, n° 3 (janvier 2006): 247-58. <https://doi.org/10.1080/13638490500523234>.
- ²⁶Jaspers, Ellen, Kaat Desloovere, Herman Bruyninckx, Guy Molenaers, Katrijn Klingels, et Hilde Feys. « Review of Quantitative Measurements of Upper Limb Movements in Hemiplegic Cerebral Palsy ». *Gait & Posture* 30, n° 4 (novembre 2009): 395-404. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2009.07.110>.
- ²⁷Reyes-Guzmán, Ana de los, Iris Dimbwadyo-Terrer, Fernando Trincado-Alonso, Félix Monasterio-Huelin, Diego Torricelli, et Angel Gil-Agudo. « Quantitative Assessment Based on Kinematic Measures of Functional Impairments during Upper Extremity Movements: A Review ». *Clinical Biomechanics* 29, n° 7 (août 2014): 719-27. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2014.06.013>.
- ²⁸Rau, G., C. Disselhorst-Klug, et R. Schmidt. « Movement Biomechanics Goes Upwards: From the Leg to the Arm ». *Journal of Biomechanics* 33, n° 10 (octobre 2000): 1207-16. [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(00\)00062-2](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(00)00062-2).
- ²⁹Thomas, Brittany L., Jenni M. Karl, et Ian Q. Whishaw. « Independent Development of the Reach and the Grasp in Spontaneous Self-Touching by Human Infants in the First 6 Months ». *Frontiers in Psychology* 5 (8 janvier 2015). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01526>.
- ³⁰Chen, Yu-ping, et Tsui-Fen Yang. « Effect of Task Goals on the Reaching Patterns of Children With Cerebral Palsy ». *Journal of Motor Behavior* 39, n° 4 (juillet 2007): 317-25. <https://doi.org/10.3200/JMBR.39.4.317-325>.
- ³¹Balasubramanian, S., A. Melendez-Calderon, et E. Burdet. « A Robust and Sensitive Metric for Quantifying Movement Smoothness ». *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 59, n° 8 (août 2012): 2126-36. <https://doi.org/10.1109/TBME.2011.2179545>.
- ³²Boxum, Anke G, Sacha La Bastide-Van Gemert, Linze-Jaap Dijkstra, Elisa G Hamer, Tjitske Hielkema, Heleen A Reinders-Messelink, et Mijna Hadders-Algra. « Development of the Quality of Reaching in Infants with Cerebral Palsy: A Kinematic Study ». *Developmental Medicine & Child Neurology* 59, n° 11 (novembre 2017): 1164-73. <https://doi.org/10.1111/dmcn.13538>.
- ³³Cacioppo, Marine, Antoine Marin, Hélène Rauscent, Estelle Le Pabic, Florence Gaillard, Sylvain Brochard, Ronan Garlantezec, Armel Cretual, et Isabelle Bonan. « A New Child-Friendly 3D Bimanual Protocol to Assess Upper Limb Movement in Children with Unilateral Cerebral Palsy: Development and Validation ». *Journal of Electromyography and Kinesiology* 55 (décembre 2020): 102481. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2020.102481>.

Liste des figures

Figure 1 : Schéma du positionnement des marqueurs

Figure 2 : Position de l'enfant

Figure 3 : Graphiques de la courbe d'altitude sur 3 essais

Figure 4 : Graphique de la courbe d'altitude de Dom 0

Figure 5 : Graphiques de la courbure de Dom 0

Figure 6 : Pic de la courbure de Dom 0

Figure 9 : Tableau de comparaison entre différentes méthodes de détermination de fin du mouvement basé sur les moyennes des ratios d'erreurs

Figure 10 : Cinématique de l'épaule à J90 pour le MS non dominant

Figure 11 : Cinématique du coude à J0 pour le MS non dominant

Liste des tableaux

Tableau 1 : Paramètres de qualité de la trajectoire

Tableau 2 : Paramètres de cinématique

Tableau 3 : Variation des PST, des paramètres de qualité et de cinématique

Tableau 4 : Tableau récapitulatif des évaluations biomécaniques de méthode de rééducation pour enfants avec PC 10

Tableau 5 : Tableau non exhaustif des débuts et fins de mouvement dans la littérature

Tableau 6 : tableau récapitulation des résultats de Cacioppo et al. 2020

Tableau 7 : Description de la population pour l'analyse des PST et des paramètres de qualité

Tableau 8 : Tableau de description de la population pour l'analyse des paramètres de cinématique

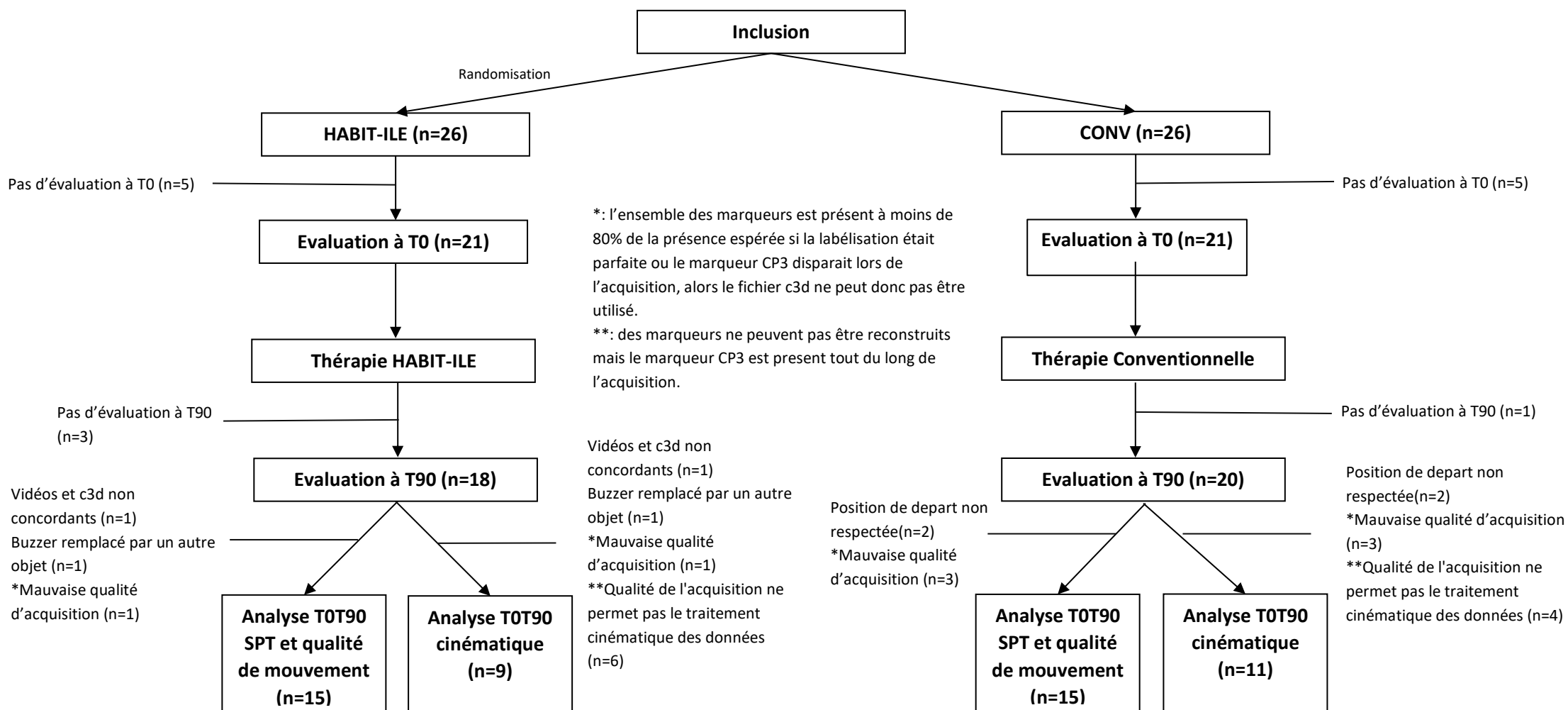
Tableau 10 : Tableau de comparaison entre différentes méthodes de détermination de début et fin du mouvement

Annexes

Annexe 1 : Détail des paramètres utilisés

	Paramètre	Définition	Formules	Sans dimension	Réponse monotone	Sensible aux variation	Faible complexité algorithmique	Robuste au bruit	Articles
Paramètres spatio-temporels	Durée	Durée déterminée par le début et la fin du mouvement	$D = t_f - t_i$	O	X	X	X	X	
	Durée jusqu'au pic	Durée déterminée par le début du mouvement et l'indice du maximum de l'altitude	$D_{max} = t_{max} - t_i$	O	X	X	X	X	
	Vitesse moyenne	Rapport entre la distance parcourue et la durée du mouvement	$v_m = \frac{D}{t}$	O	X	O	X	X	
	Vitesse maximale	Vitesse maximale lors du mouvement	v_{max}	O	X	X	X	O	
Paramètres de fluidité	Unité de Mouvement	Nombre de maximums locaux de la norme de la vitesse	$v_{maxima} \triangleq \{v(t) : \frac{dv}{dt} = 0 \text{ et } \frac{d^2v}{dt^2} < 0\}$	X	X	X	X	O	Hogan et al. 2009
	Unité de Mouvement de Transport	La longueur de la 1ère unité de mouvement sur la longueur total du mouvement	$v_1 = \frac{T_{v1}}{T}$	X	X	X	X	O	Boxum et al. 2017
	Nombre de passage par 0 normalisé	Nombre de passage par 0 de la courbe d'accélération normalisé par la distance parcourue au cours du mouvement	$v_0 \triangleq \frac{\{\frac{dv}{dt} = 0\}}{D}$	O	X	X	X	O	Standlund et al. 2014
	Rapport entre Vitesse moyenne et Vitesse maximale	Rapport entre Vitesse moyenne et Vitesse maximale	$r = \frac{v_m}{v_{max}}$	X	X	O	X	X	Daly et al. 2005
	sans dimension JERK	Intégrale de la dérivée de l'accélération	$\eta_{dj} \triangleq -\frac{(t_2 - t_1)^3}{v_{max}^2} \int_{t_1}^{t_2} \frac{d^2v}{dt^2} dt$	O	O	X	O	X	
	Log sans dimension JERK	Logarithme de l'intégrale de la dérivée de l'accélération	$\eta_{ldj} \triangleq -\ln(\frac{(t_2 - t_1)^3}{v_{max}} \int_{t_1}^{t_2} \frac{d^2v}{dt^2} dt)$	X	X	X	O	X	
	SPARC	Spectral Arc Length - Longueur de la courbe du profil de la transformée de Fourier du signal	$\eta_{ldj} \triangleq -\ln(\sqrt{\frac{1}{(t_2 - t_1)^2} + (\frac{d\hat{v}}{dt})^2} dt)$	X	X	X	O	X	Balasubramanian et al. 2012
Paramètres de rectitude	Indice de courbure	Rapport de la distance parcourue par un enfant pour rejoindre 2 points sur la distance la plus courte entre ces 2 points	$r = \frac{D_{parcourue}}{D_{efficace}}$	X	X	X	X	O	Butler et al. 2012

Annexe 2 : Diagramme de flux de l'étude



Annexe 3 : Modèle Cinématique

Tronc	
X	ZxY
Y	(PX/T8)-(IJ/C7)
Z	(IJ-C7)x(C7-PX/T8)
Origine	IJ

Référentiel du tronc

PX : Processus Xiphoïde, T8 : 8^{ème} vertèbre thoracique, IJ : Incisure Jugulaire, C7 : 7^{ème} vertèbre cervicale
 - : vecteur, X : produit matriciel, / : centre de 2 points

Humérus	
X	(EL-EM)x(EM-A)
Y	(EL/EM)-A
Z	XxY
Origine	A

Référentiel du bras

EL : Epicondyle latéral, EM : Epicondyle médial, A : Acromion
 - : vecteur, X : produit matriciel, / : centre de 2 points

Avant bras	
X	(SU-SR)x(SR-EL/EM)
Y	SU - (EL/EM)
Z	XxY
Origine	SU - (EL/EM)

Référentiel de l'avant-bras

SU : Styloïde ulnaire, SR : Styloïde radial
 - : vecteur, X : produit matriciel, / : centre de 2 points

Main	
X	(MET2-SU/SR)x(MET2-MET5)
Y	(SU/SR)-(MET2-MET5)
Z	X-Y
Origine	CP3

Référentiel de la main

MET2 : 2^{ème} métacarpe, MET5 : 5^{ème} métacarpe, CP3 : 3^{ème} articulation métacarpe
 - : vecteur, X : produit matriciel, / : centre de 2 points

Articulation	Angle	X	Y	Z
	Thorax/Laboratoire			
Epaule	Humérus/Thorax	Flexion(+)/Extension(-)	Adduction(+)/Abduction(-)	Rotation interne(+)/Rotation externe(-)
Coude	Avant-bras/Humérus	Flexion(+)/Extension(-)	Adduction(+)/Abduction(-)	Rotation interne(-)/Rotation externe(+)
Poignet	Main/Avant-bras	Flexion(-)/Extension(+)	Adduction(-)/Abduction(+)	Rotation interne(-)/Rotation externe(+)
<i>Détail des signes des rotations du membres supérieur droit</i>				

Articulation	Angle	X	Y	Z
	Thorax/Laboratoire			
Epaule	Humérus/Thorax	Flexion(+)/Extension(-)	Adduction(-)/Abduction(+)	Rotation interne(-)/Rotation externe(+)
Coude	Avant-bras/Humérus	Flexion(+)/Extension(-)	Adduction(-)/Abduction(+)	Rotation interne(+)/Rotation externe(-)
Poignet	Main/Avant-bras	Flexion(-)/Extension(+)	Adduction(+)/Abduction(-)	Rotation interne(+)/Rotation externe(-)
<i>Détail des signes des rotations du membres supérieur gauche</i>				

Evaluation n°1: 27/05/2021
Evaluation n°2: 27/08/2021
Création du rapport: 10/06/2022

RAPPORT

Sujet: 02.11.02

Organisme: BEaCHILD

DATE DE NAISSANCE

20/05/2019

GENRE

M

ATTEINTE

Bilatérale

LATERALITE

Membre gauche le plus affecté

ETIOLOGIE

PREMATURITE

SCORE MACS

II

MINI GMFCS

II

Rapport sur les données

J0 dominant

	Missing from c3d	Flash	Not_reconstructed
LA_01	[C7]	[LMEPI]	[C7]
LA_02		[LMEPI]	
LA_03		[LMEPI]	
LA_04		[C7, LMEPI]	
LA_06		[LMEPI]	
LA_07		[LMEPI]	

J90 dominant

	Missing from c3d	Flash	Not_reconstructed
LA_01		[LMEPI]	
LA_02			
LA_03		[C7, LMEPI]	
LA_04		[C7]	
LA_05		[LMEPI]	

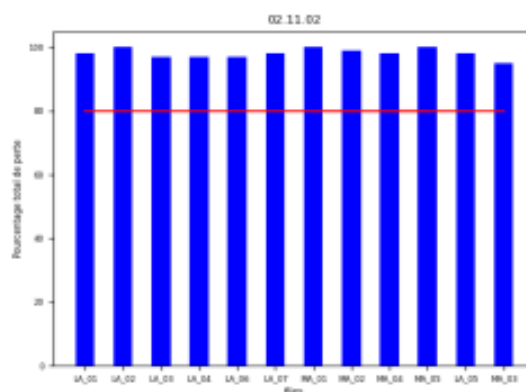
J0 non dominant

	Missing from c3d	Flash	Not_reconstructed
MA_01			
MA_02		[RMEPI]	
MA_04		[RMEPI]	
MA_05			

J90 non dominant

	Missing from c3d	Flash	Not_reconstructed
MA_01		[C7, RMEPI, RRUL, RMETS]	
MA_02		[RMEPI, RRAD]	
MA_03		[C7, RMEPI]	
MA_04		[RMEPI]	
MA_05		[RMEPI, RRAD]	

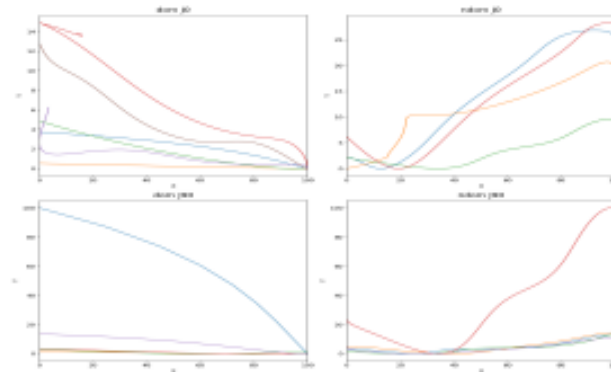
Pourcentage de perte totale



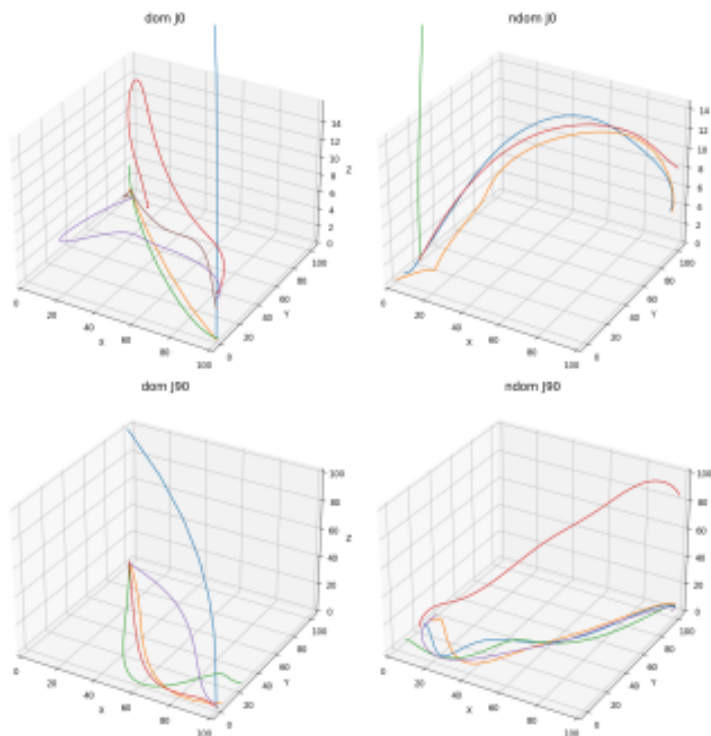
Calcul déterminé après interpolation sur VICON NEXUS
Pourcentage de perte de l'ensemble des marqueurs

Présentation des essais de la tâche Reach Buzzer

Profile des trajectoires en 2D

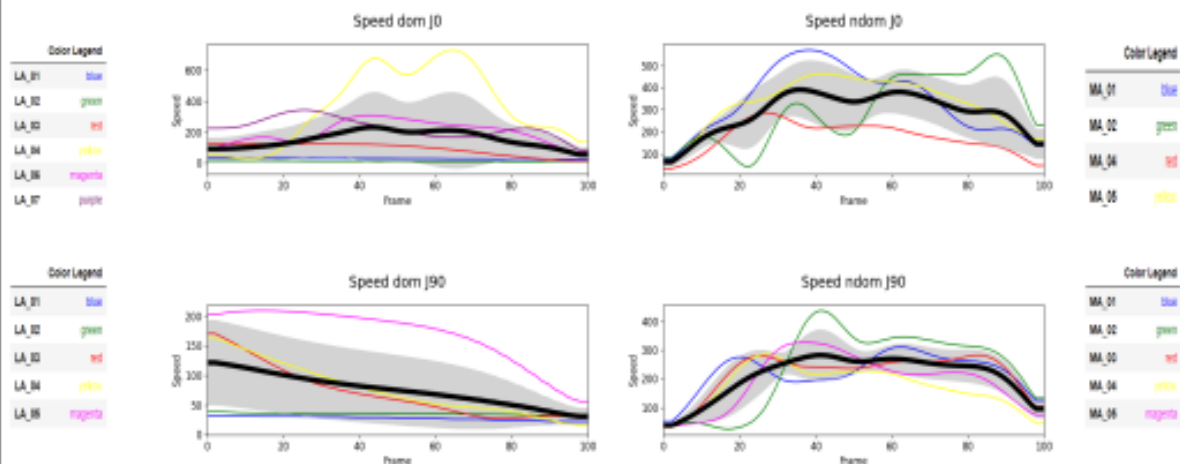


Profile des trajectoires en 3D

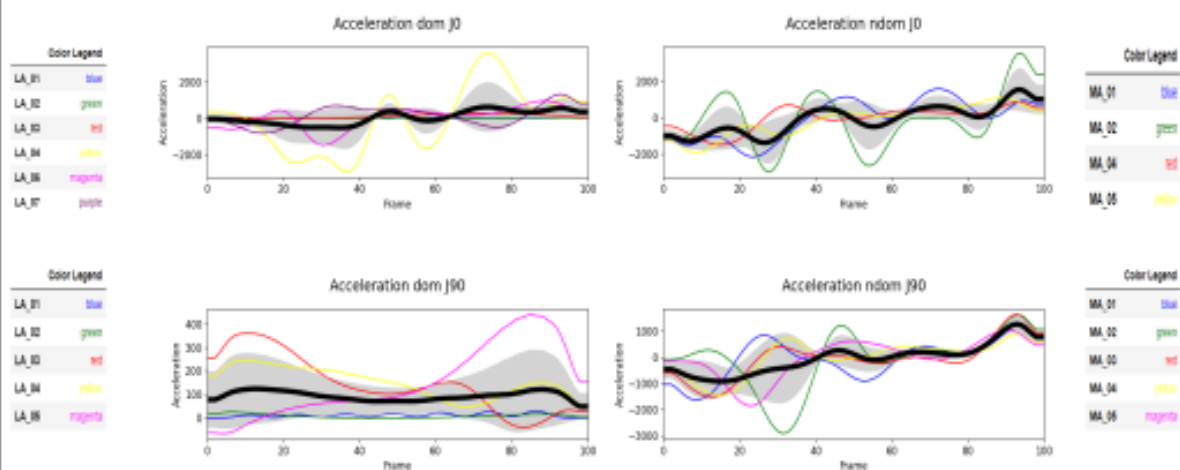


Paramètres spatio-temporels

Norme de la vitesse



Norme de l'accélération



Valeurs des paramètres pour chaque fichier

J0 dom

Files	Duration (s)	Time to peak velocity (%)	Mean Velocity (mm/s)	Peak of Velocity (mm/s)	Movement unit	Transport Unit	RV	Jerk	Log_jerk	Spacc	Hpl	Index of curvature
LA_02	0.74	0.57	373.80	603.59	2.80	0.05	0.62	-1945.08	-7.57	-1.70	0.08	1.57
LA_03	0.63	0.39	426.66	658.24	2.80	0.21	0.66	-999.51	-6.85	-1.68	0.08	1.57
LA_04	1.11	0.88	338.23	707.54	4.80	0.06	0.44	-8018.33	-8.82	-1.84	7.08	2.01
LA_06	0.82	0.61	275.17	564.96	3.80	0.09	0.49	-5685.58	-8.65	-1.68	5.08	1.57
LA_07	0.66	0.35	370.11	597.93	3.80	0.15	0.62	-3029.08	-6.82	-1.80	5.08	1.25
Lower Limit	0.47	0.06	288.97	919.48	8.80	-0.08	0.31	-9629.48	-9.94	-1.74	0.08	1.12
Upper Limit	1.03	0.94	423.66	728.70	4.50	0.29	0.81	2668.26	-6.15	-1.64	8.08	1.53

J0 ndom

Files	Duration (s)	Time to peak velocity (%)	Mean Velocity (mm/s)	Peak of Velocity (mm/s)	Movement unit	Transport Unit	RV	Jerk	Log_jerk	Spacc	Hpl	Index of curvature
MA_01	0.86	0.37	382.36	665.33	3.00	0.36	0.58	-1773.27	-7.48	-1.67	5.08	1.66
MA_02	0.83	0.67	359.31	676.38	5.00	0.10	0.53	-10817.48	-9.26	-1.82	9.08	1.64
MA_04	0.68	0.36	254.41	634.75	2.00	0.25	0.68	-1885.95	-7.53	-1.70	3.08	1.14
MA_06	0.62	0.40	529.33	753.11	1.00	0.39	0.75	-548.99	-6.30	-1.59	1.08	1.58
Lower Limit	0.41	0.08	182.88	468.58	-0.88	-0.02	0.58	-7689.52	-8.13	-1.85	-2.75	1.06
Upper Limit	1.18	0.78	565.88	831.14	6.12	0.60	0.78	2368.99	-6.02	-1.53	11.25	1.98

J90 dom

Files	Duration (s)	Time to peak velocity (%)	Mean Velocity (mm/s)	Peak of Velocity (mm/s)	Movement unit	Transport Unit	RV	Jerk	Log_jerk	Spacc	Hpl	Index of curvature
LA_01	0.67	0.39	293.70	481.75	3.80	0.03	0.84	-3881.52	-7.96	-1.85	5.08	1.46
LA_02	0.90	0.63	251.13	684.56	3.80	0.07	0.52	-3781.91	-7.89	-1.77	9.08	1.26
LA_03	0.93	0.81	287.87	498.80	3.80	0.10	0.82	-1280.01	-7.36	-1.86	9.08	1.28
LA_04	0.92	0.45	237.13	481.73	3.80	0.07	0.49	-1964.27	-7.53	-1.57	3.08	1.27
LA_06	0.61	0.59	436.61	738.67	3.80	0.11	0.55	-1389.75	-7.19	-1.59	5.08	1.28
Lower Limit	0.30	0.24	187.26	498.17	3.80	0.02	0.46	-4990.18	-8.06	-2.98	0.08	1.23
Upper Limit	1.29	0.80	357.56	524.39	3.80	0.14	0.60	896.49	-6.05	-1.31	5.08	1.33

J90 ndom

Files	Duration (s)	Time to peak velocity (%)	Mean Velocity (mm/s)	Peak of Velocity (mm/s)	Movement unit	Transport Unit	RV	Jerk	Log_jerk	Spacc	Hpl	Index of curvature
MA_01	0.59	0.61	376.38	552.52	2.80	0.17	0.71	-3152.56	-8.06	-1.82	3.08	1.26
MA_02	0.66	0.41	357.82	673.14	3.80	0.05	0.53	-3518.08	-8.17	-1.82	5.08	1.28
MA_03	0.61	0.82	388.16	498.47	3.80	0.23	0.77	-3077.42	-8.03	-1.92	9.08	1.28
MA_04	0.68	0.26	254.41	424.70	2.80	0.25	0.60	-1965.95	-7.53	-1.70	3.08	1.14
MA_06	0.72	0.36	267.29	655.94	3.80	0.35	0.59	-1238.97	-7.12	-1.61	3.08	1.26
Lower Limit	0.50	-0.02	138.99	341.08	8.80	0.06	0.41	-8082.48	-8.84	-2.82	0.08	1.07
Upper Limit	0.79	0.98	494.46	647.39	4.50	0.37	0.89	63.56	-6.74	-1.50	8.08	1.41

Paramètres spatio-temporel

		J0 - Dom	J90 - Dom	J0 - nDom	J90 - nDom
Duration (s)	All trials	[0.62, 1.11, 0.66]	[0.67, 0.9, 0.92]	[0.66, 0.66, 0.62]	[0.59, 0.61, 0.66, 0.72]
	Mean	0.80	0.83	0.72	0.65
	Std	0.22	0.11	0.10	0.09
Time to peak velocity (%)	All trials	[0.39, 0.68, 0.38]	[0.39, 0.63, 0.48]	[0.37, 0.26, 0.4]	[0.61, 0.82, 0.26, 0.36]
	Mean	0.47	0.49	0.34	0.51
	Std	0.15	0.10	0.06	0.22
Mean Velocity (mm/s)	All trials	[427.0, 339.0, 370.0]	[294.0, 251.0, 237.0]	[392.0, 254.0, 529.0]	[376.0, 356.0, 254.0, 267.0]
	Mean	378.67	260.67	391.67	313.75
	Std	36.44	24.26	112.27	83.83
Peak of Velocity (mm/s)	All trials	[650.0, 768.0, 598.0]	[482.0, 484.0, 482.0]	[665.0, 425.0, 753.0]	[533.0, 466.0, 425.0, 456.0]
	Mean	672.00	482.67	614.33	470.00
	Std	71.12	0.94	136.62	59.39

Paramètres de qualité

Paramètres de fluidité

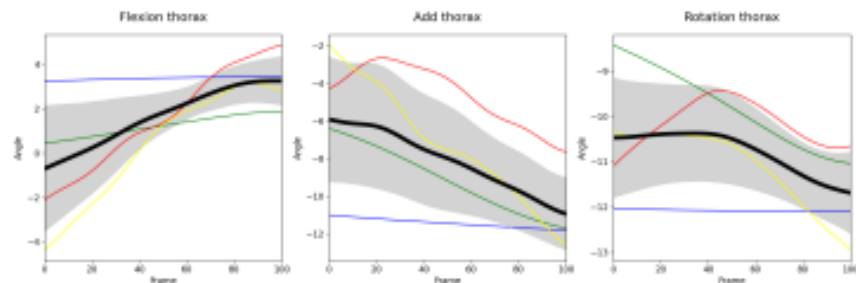
		J0 - Dom	J90 - Dom	J0 - nDom	J90 - nDom
Movement unit	All trials	[2.4.3]	[3.6.2]	[3.2.1]	[2.3.2.2]
	Mean	3.00	3.33	2.00	2.26
	Std	0.82	1.28	0.82	0.43
Transport movement unit	All trials	[0.37 0.68 0.18]	[0.03 0.07 0.07]	[0.36 0.28 0.38]	[0.17 0.23 0.28 0.38]
	Mean	0.19	0.06	0.33	0.26
	Std	0.13	0.02	0.13	0.06
RV	All trials	[0.46 0.44 0.62]	[0.51 0.52 0.49]	[0.59 0.6 0.7]	[0.71 0.77 0.6 0.56]
	Mean	0.57	0.54	0.65	0.66
	Std	0.09	0.05	0.05	0.06
Jerk	All trials	[-999.61 -5016.35 -3029.09]	[-2651.32 -2761.91 -1864.27]	[-1773.27 -1865.95 -546.98]	[-3152.66 -3077.42 -1865.95 -1236.97]
	Mean	-2995.64	-2499.17	-1595.42	-2333.72
	Std	1665.34	449.84	601.11	612.84
Log_jerk	All trials	[-6.88 -8.82 -6.02]	[-7.96 -7.93 -7.83]	[-7.48 -7.83 -6.3]	[-8.06 -8.03 -7.83 -7.12]
	Mean	-7.79	-7.81	-7.11	-7.69
	Std	0.70	0.19	0.37	0.39
Spore	All trials	[-1.88 -1.64 -1.8]	[-1.85 -1.77 -1.57]	[-1.87 -1.7 -1.59]	[-1.82 -1.52 -1.7 -1.61]
	Mean	-1.70	-1.73	-1.65	-1.76
	Std	0.07	0.12	0.04	0.12
Np0	All trials	[5.7.5]	[5.9.9]	[5.5.1]	[5.5.3.9]
	Mean	5.60	5.67	5.60	5.60
	Std	1.63	2.49	1.63	0.67

Paramètres de rectitude

		J0 - Dom	J0 - nDom	J90 - Dom	J90 - nDom
Index of curvature	All trials	[1.27 2.01 1.25]	[1.66 1.14 1.5]	[1.4 1.26 1.27]	[1.26 1.28 1.14 1.39]
	Mean	1.51	1.43	1.31	1.27
	Std	0.36	0.22	0.06	0.09

Cinématique à J0 pour membre dominant

Thorax



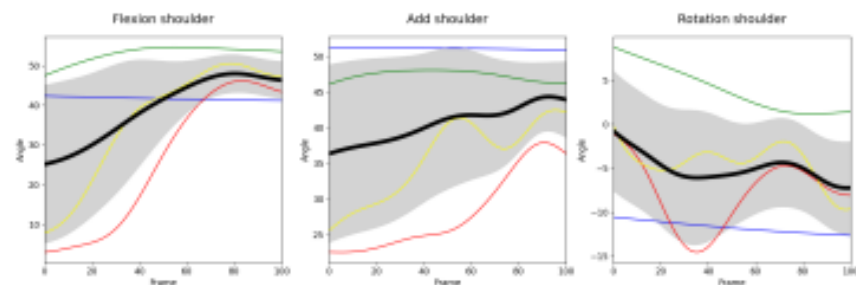
Color Legend

LA_02	blue
LA_03	green
LA_06	red
LA_07	yellow

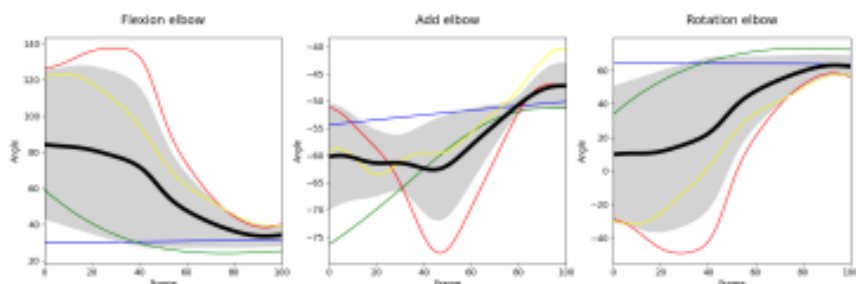
TFMD

LA_02	-0.97
LA_03	-0.47
LA_06	0.88
LA_07	0.47

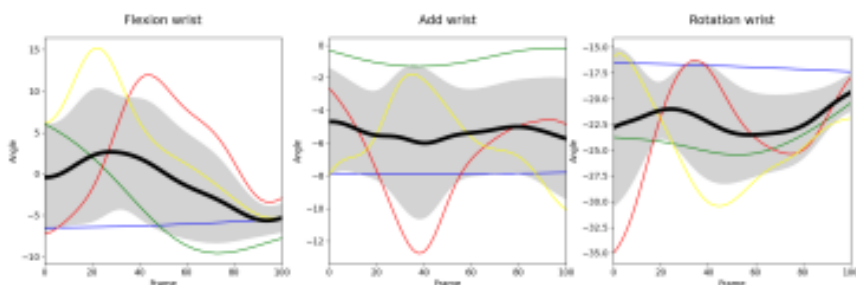
Shoulder



Elbow

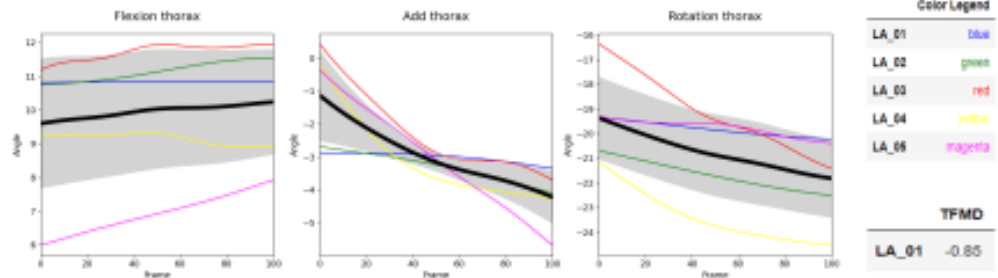


Wrist

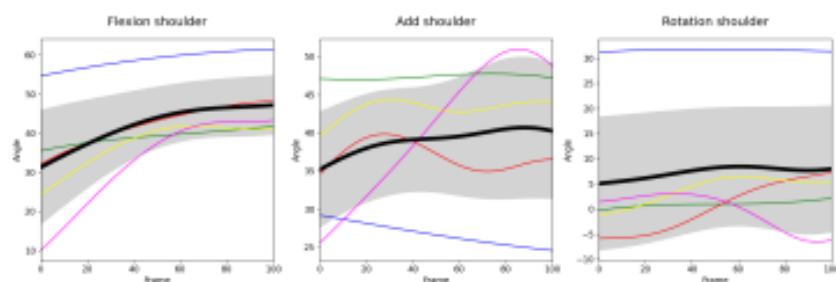


Cinématique à J90 pour le membre dominant

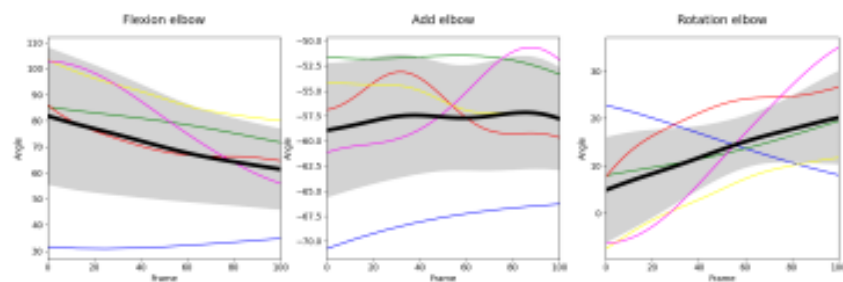
Thorax



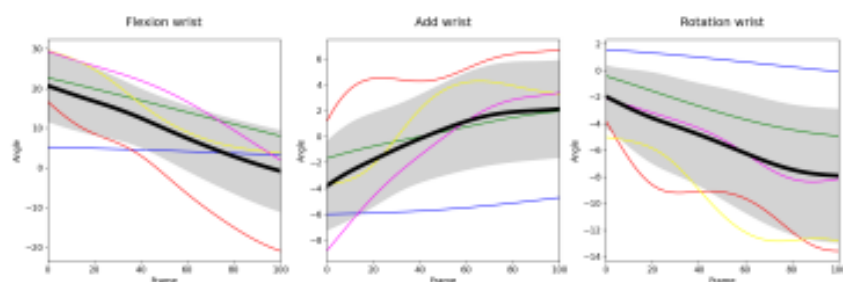
Shoulder



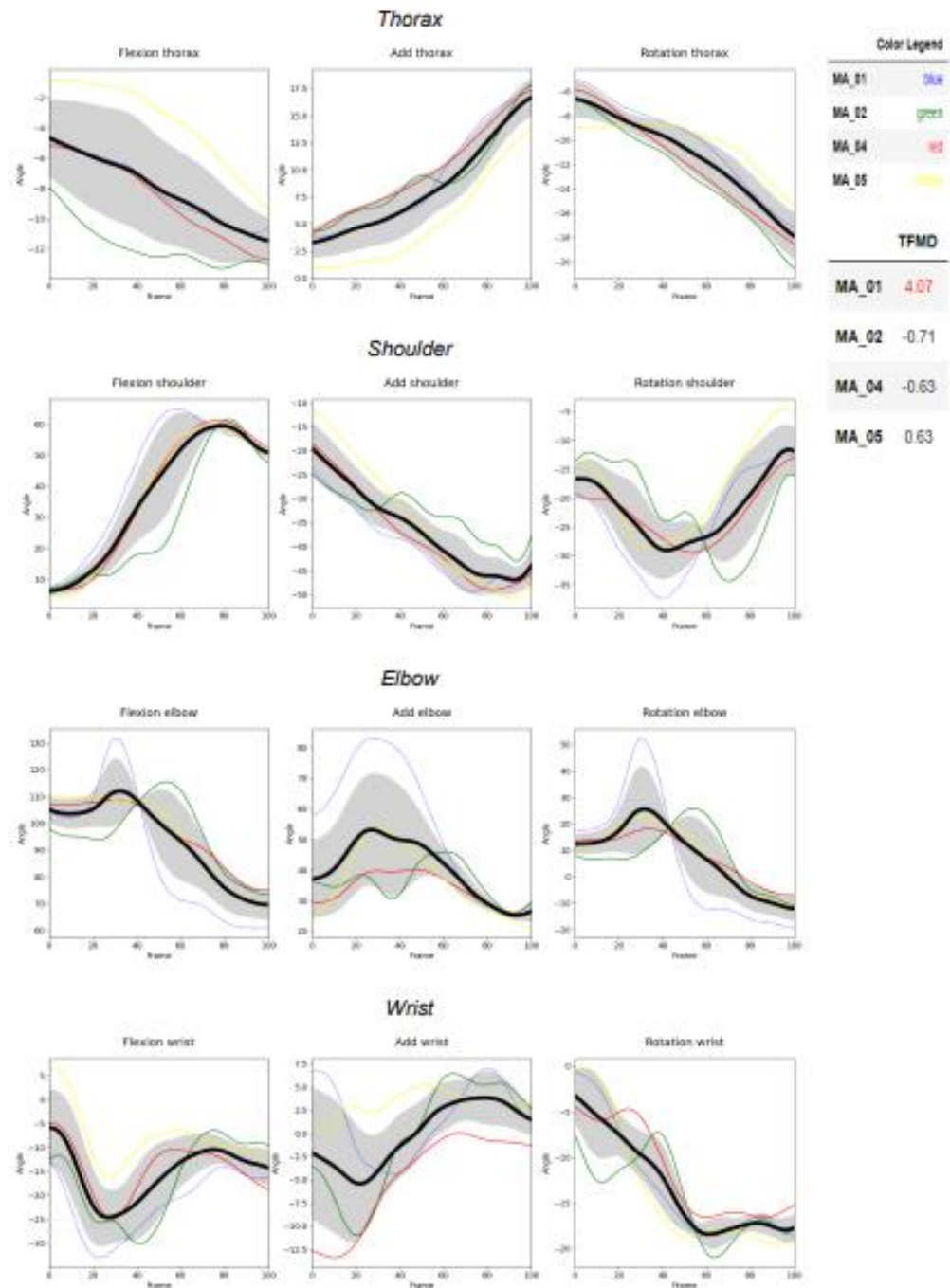
Elbow



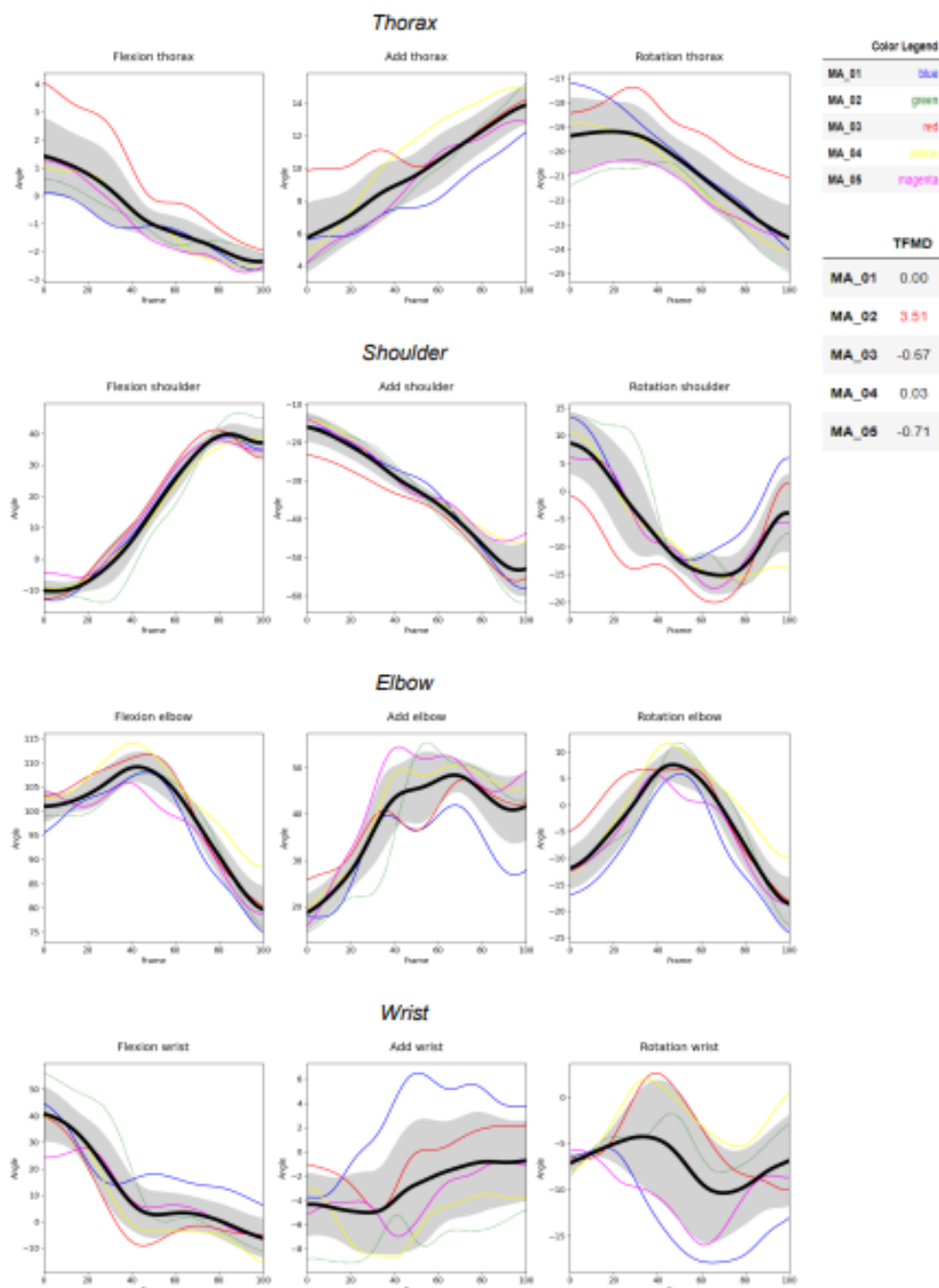
Wrist



Cinématique à J0 pour le membre non dominant



Cinématique à J90 pour le membre non dominant



Paramètres cinématiques du tronc

Thorax

		J0 - Dom	J90 - Dom	J0 - nDom	J90 - nDom
ROM	All trials	[0.22, 1.42, 6.96, 7.55]	[0.04, 0.78, 0.77, 0.43, 1.93]	[6.2, 5.4, 7.5, 8.64]	[2.79, 2.68, 5.99, 3.64, 4.03]
	Mean	4.044727	0.789003	6.933865	3.827907
	Std	3.257644	0.632868	1.23614	1.19657
MAX flexion	All trials	[3.45, 1.86, 4.87, 3.17]	[10.84, 11.53, 11.96, 9.33, 7.92]	[-4.79, -7.91, -5.2, -0.79]	[0.11, 0.6, 4.05, 1.05, 1.26]
	Mean	3.335632	10.31577	-4.672651	1.419159
	Std	1.068437	1.492335	2.542561	1.373736

Shoulder

		J0 - Dom	J90 - Dom	J0 - nDom	J90 - nDom
ROM	All trials	[1.19, 7.2, 43.14, 42.71]	[6.86, 6.23, 16.33, 17.76, 33.26]	[57.37, 54.28, 55.05, 55.6]	[52.5, 60.79, 54.25, 48.63, 43.85]
	Mean	23.560175	16.085139	55.575364	52.003558
	Std	19.485003	9.795182	1.136722	5.681516
MAX extension	All trials	[42.35, 54.66, 46.14, 50.51]	[51.5, 41.71, 48.33, 41.86, 43.24]	[54.9, 61.57, 61.13, 59.55]	[29.11, 46.72, 41.28, 39.08, 37.94]
	Mean	46.415036	47.330305	61.788587	40.825483
	Std	4.617267	7.484696	1.948628	3.137699
MAX abduction	All trials	[51.25, 48.09, 37.95, 42.49]	[29.2, 47.73, 39.81, 44.34, 50.94]	[-23.7, -24.74, -18.35, -11.2]	[-15.71, -13.11, -23.13, -13.97, -13.9]
	Mean	44.949019	42.404645	-19.497968	-15.964379
	Std	5.11896	7.562153	5.368489	3.681332

Elbow

		J0 - Dom	J90 - Dom	J0 - nDom	J90 - nDom
ROM	All trials	[28.58, 56.85, 139.69, 127.63]	[23.58, 74.58, 74.89, 54.43, 57.0]	[142.64, 128.82, 121.58, 119.69]	[110.71, 109.91, 113.63, 116.67, 108.66]
	Mean	88.687664	72.975641	128.184301	111.916122
	Std	48.428513	26.245968	9.016568	2.885877
MAX extension	All trials	[31.81, 59.28, 137.58, 123.24]	[34.78, 85.32, 86.08, 103.33, 102.99]	[131.66, 115.51, 108.88, 110.26]	[105.03, 107.83, 111.69, 114.08, 103.9]
	Mean	87.978559	82.503358	116.577785	109.507375
	Std	43.825066	25.107084	9.050548	2.953297
MAX supination	All trials	[54.37, 73.32, 58.34, 57.47]	[22.8, 9.04, 19.47, 0.78, 26.6, 0.77, 11.73, 0...]	[52.28, 26.83, 18.08, 22.54]	[5.87, 11.74, 6.92, 11.62, 5.81]
	Mean	63.375918	11.955264	29.679672	8.389571
	Std	6.326849	12.432457	13.332633	2.713675

Wrist

		J0 - Dom	J90 - Dom	J0 - nDom	J90 - nDom
ROM	All trials	[-8.69, 5.61, 14.04, 19.56]	[-5.66, 11.9, 5.47, 20.54, 23.35]	[-1.68, 6.9, 7.85, 16.01]	[47.33, 58.26, 41.54, 41.67, 30.64]
	Mean	7.631307	11.120941	7.271029	43.888041
	Std	10.652371	10.511459	6.262709	8.993094

Annexe 4 : Rapport Patient 02.10.01

Evaluation n°1: 01/07/2020
Evaluation n°2: 01/10/2020
Création du rapport: 10/06/2022

RAPPORT

Sujet: 01.10.01

Organisme: BEaCHILD

DATE DE NAISSANCE

06/2016

GENRE

M

ATTEINTE

Bilatérale

LATERALITE

Membre droit le plus affecté

ETIOLOGIE

periventricular leukomalacia

SCORE MACS

I

MINI GMFCS

III

Page: 1/11

Rapport sur les données

J0 dominant

	Missing from cdd	Flash	Not_reconstructed
LA_	[RMEPI]	[RPROX]	[RMEPI]
LA_01		[RMEPI, RPROX]	
LA_02		[RMEPI, RPROX]	
LA_04			
LA_06		[RBH, RMEPI, RPROX]	

J90 dominant

	Missing from cdd	Flash	Not_reconstructed
LA_01		[L, RMEPI, RLEPI, RRAU]	[RLEPI, RMEPI, RRAU]
LA_02		[LBH, LPH, L, TR, RMEPI]	
LA_04		[LBH, LPH, TR, RMEPI, RRAU, RMEPI]	
LA_06		[LBH, L, TR, RMEPI, RLEPI, RRAU]	[RLEPI, RMEPI, RRAU]

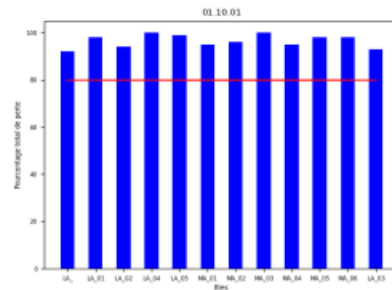
J0 non dominant

	Missing from cdd	Flash	Not_reconstructed
MA_01		[RBH, LBH, L, LMEPI, LRAO]	
MA_02		[L, LMEPI, LMET2]	
MA_04			
MA_04		[LBH, LMEPI, LMET2]	
MA_04	[LMET2]	[LMEPI, LRAO]	[LMET2]
MA_06	[LMET2]	[LMEPI]	[LMET2]

J90 non dominant

	Missing from cdd	Flash	Not_reconstructed
MA_01		[LMEPI, LLEPI, LRAO]	[LLEPI, LMEPI, LRAO]
MA_02	[L]	[TR, LMEPI]	[L, TR]
MA_04		[TR, LMEPI, LPROX, LRAO, LMET2]	[LMEPI, LPROX, LRAO]
MA_04		[RBH, TR, LMEPI, LRAO]	
MA_06		[TR, LMEPI, LMET2]	
MA_06		[L, TR, LMEPI, LMET2]	

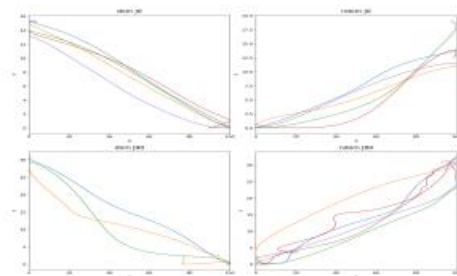
Pourcentage de perte totale



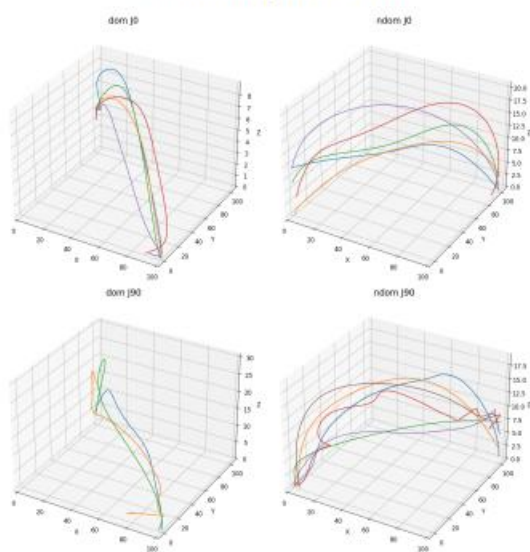
Calcul déterminé après interpolation sur VICON NEXUS
Pourcentage de perte de l'ensemble des marqueurs

Présentation des essais de la tâche Reach Buzzer

Profile des trajectoires en 2D

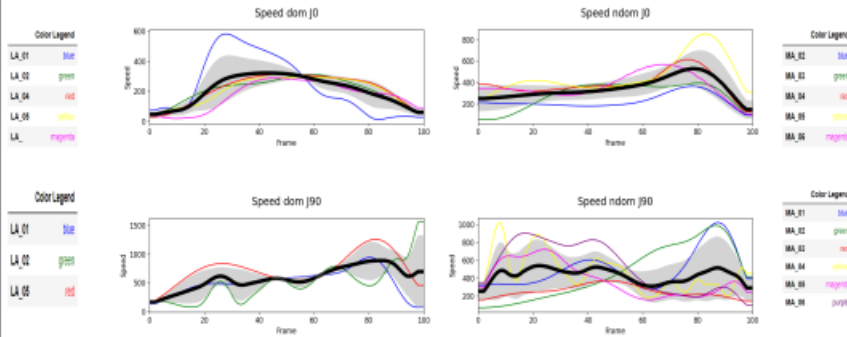


Profile des trajectoires en 3D

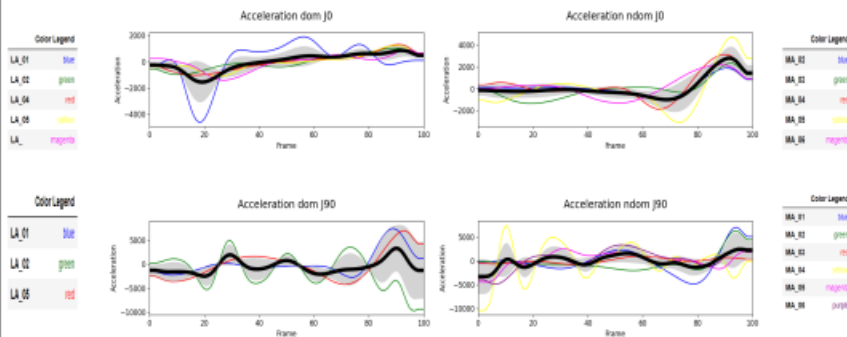


Paramètres spatio-temporels

Norme de la vitesse



Norme de l'accélération





Valeurs des paramètres pour chaque fichier

J0 dom

Files	Duration (s)	Time to peak velocity (%)	Mean Velocity (mm/s)	Peak of Velocity (mm/s)	Movement Unit	Transport Unit	RV	Jerk	Log_jerk	Spars	Hp0	Index of curvature
LA_01	0.58	0.35	248.85	617.53	3.85	0.44	0.45	-4530.15	-0.06	-1.93	1.90	1.42
LA_02	0.58	0.34	411.50	631.97	1.93	0.52	0.55	-368.93	-0.91	-1.89	1.93	1.28
LA_04	0.45	0.47	478.47	707.73	1.93	0.44	0.58	-628.42	-0.44	-1.62	1.90	1.17
LA_05	0.53	0.55	368.23	564.68	1.93	0.53	0.69	-818.61	-0.71	-1.58	1.90	1.43
LA_06	0.72	0.43	237.66	435.35	1.93	0.42	0.59	-1934.79	-7.57	-1.41	2.90	1.24
Lower Limit	0.17	0.25	4.35	453.73	1.93	0.26	0.46	-5892.85	-9.25	-1.95	-0.06	0.97
Upper Limit	1.08	0.71	698.43	732.91	1.93	0.69	0.81	1320.54	-4.76	-1.84	3.90	1.70

J0 ndom

Files	Duration (s)	Time to peak velocity (%)	Mean Velocity (mm/s)	Peak of Velocity (mm/s)	Movement Unit	Transport Unit	RV	Jerk	Log_jerk	Spars	Hp0	Index of curvature
MA_02	0.91	0.59	473.61	924.88	1.96	0.39	0.51	-1099.62	-7.30	-2.08	1.90	1.27
MA_03	0.58	0.75	560.90	759.29	2.00	0.40	0.54	-1745.92	-7.47	-1.67	3.00	1.40
MA_04	0.58	0.75	925.23	1837.67	1.96	0.50	0.55	-2433.16	-7.30	-1.58	1.90	2.95
MA_05	0.51	0.83	595.59	1837.43	2.00	0.24	0.49	-3195.22	-8.94	-1.88	3.00	2.64
MA_06	0.45	0.74	1114.54	2091.78	2.00	0.31	0.53	-1334.31	-7.20	-1.69	3.00	2.23
Lower Limit	0.48	0.73	-5.24	-533.91	2.00	-0.00	0.44	-4881.29	-8.70	-2.21	3.00	0.16
Upper Limit	0.93	0.85	1081.13	3396.18	2.00	0.63	0.63	313.88	-8.30	-1.38	3.00	3.47

J90 dom

Files	Duration (s)	Time to peak velocity (%)	Mean Velocity (mm/s)	Peak of Velocity (mm/s)	Movement Unit	Transport Unit	RV	Jerk	Log_jerk	Spars	Hp0	Index of curvature
LA_01	0.54	0.78	882.21	1501.90	2.90	0.20	0.53	-3156.95	-8.05	-1.79	4.00	1.50
LA_02	1.32	0.58	388.81	1402.03	6.90	0.02	0.28	-24113.88	-10.09	-2.24	12.00	1.86
LA_05	0.47	0.79	1554.21	2728.82	2.90	0.21	0.57	-2963.52	-7.65	-1.91	3.00	2.28
Lower Limit	-0.08	0.64	276.54	485.87	-1.00	-0.03	0.19	-25798.19	-10.75	-2.42	-0.25	1.89
Upper Limit	1.52	1.03	2052.26	3113.46	7.90	0.35	0.77	13312.03	-6.27	-1.51	14.75	2.66

J90 ndom

Files	Duration (s)	Time to peak velocity (%)	Mean Velocity (mm/s)	Peak of Velocity (mm/s)	Movement Unit	Transport Unit	RV	Jerk	Log_jerk	Spars	Hp0	Index of curvature
MA_01	0.58	0.56	652.74	1443.35	3.08	0.14	0.45	-15452.11	-9.25	-1.34	5.00	1.73
MA_02	0.94	0.88	929.08	1499.29	2.08	0.00	0.38	-14471.98	-8.98	-1.62	3.00	1.86
MA_03	0.55	0.58	407.38	585.78	1.08	0.46	0.75	-179.13	-1.40	-1.77	2.90	1.26
MA_04	0.35	0.10	168.91	435.22	0.39	0.00	0.45	-75883.56	-15.25	-0.85	15.00	1.64
MA_05	1.27	0.29	308.73	621.78	4.08	0.15	0.50	-18543.36	-8.85	-1.97	7.00	1.25
MA_06	0.90	0.18	677.88	1348.67	3.08	0.17	0.68	-2233.69	-7.71	-1.70	8.00	1.87
Lower Limit	0.28	-0.67	-13.17	-636.98	0.08	-0.15	0.22	-37576.48	-12.28	-2.33	-1.00	0.84
Upper Limit	1.73	1.66	910.95	2468.88	6.08	0.36	0.73	15592.62	-5.59	-1.34	11.00	2.83

Paramètres spatio-temporel

		J0 - Dom	J90 - Dom	J0 - nDom	J90 - nDom
Duration (s)	All trials	[0.5, 0.45, 0.53, 0.72]	[0.64, 1.32, 0.47]	[0.61, 0.5, 0.5, 0.51, 0.42]	[0.6, 0.94, 1.27, 0.9]
	Mean	0.55	0.61	0.51	0.68
	Std	0.10	0.37	0.06	0.18
Time to peak velocity (%)	All trials	[0.54, 0.47, 0.55, 0.43]	[0.76, 0.96, 0.75]	[0.57, 0.76, 0.78, 0.8, 0.74]	[0.66, 0.68, 0.25, 0.16]
	Mean	0.50	0.65	0.61	0.55
	Std	0.05	0.09	0.08	0.32
Mean Velocity (mm/s)	All trials	[412.0, 479.0, 388.0, 238.0]	[802.0, 369.0, 1554.0]	[474.0, 961.0, 925.0, 937.0, 1119.0]	[603.0, 829.0, 309.0, 578.0]
	Mean	379.25	915.00	802.40	516.25
	Std	86.11	462.27	243.72	126.01
Peak of Velocity (mm/s)	All trials	[632.0, 708.0, 565.0, 403.0]	[1502.0, 1402.0, 2729.0]	[925.0, 799.0, 1658.0, 1897.0, 2092.0]	[1449.0, 1499.0, 622.0, 1049.0]
	Mean	577.00	1677.67	1474.20	1154.75
	Std	112.45	603.37	519.95	353.59

Paramètres de qualité

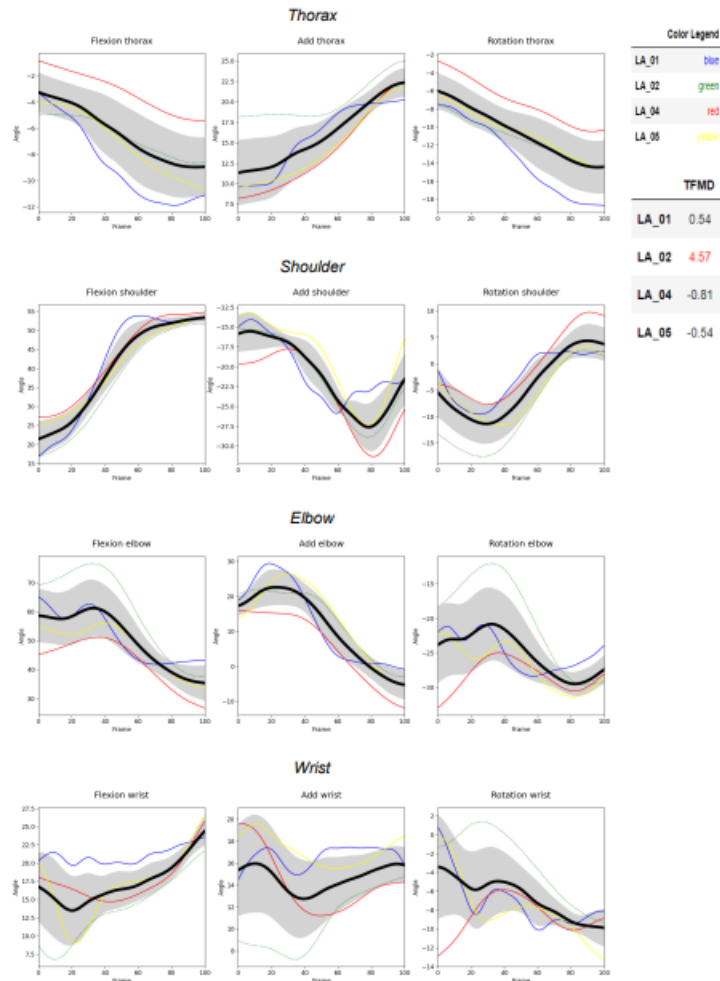
Paramètres de fluidité

		J0 - Dom	J90 - Dom	J0 - nDom	J90 - nDom
Movement unit	All trials	[1.1, 1.1]	[2.0, 2.0]	[1.2, 2.2]	[2.2, 4.3]
	Mean	1.00	2.33	2.00	3.00
	Std	0.00	1.89	0.63	0.71
Transport movement unit	All trials	[0.02, 0.44, 0.63, 0.40]	[0.2, 0.02, 0.21]	[0.39, 0.4, 0.16, 0.24, 0.31]	[0.14, 0.4, 0.16, 0.17]
	Mean	0.46	0.15	0.30	0.12
	Std	0.05	0.09	0.05	0.07
mv	All trials	[0.65, 0.66, 0.66, 0.55]	[0.55, 0.28, 0.51]	[0.51, 0.7, 0.56, 0.49, 0.55]	[0.45, 0.35, 0.5, 0.55]
	Mean	0.65	0.46	0.56	0.46
	Std	0.04	0.13	0.07	0.07
Jerk	All trials	[-368.89, -429.42, -816.61, -1034.75]	[-5136.96, -24113.88, -2363.32]	[-1099.62, -1746.32, -2433.1, -3198.23, -1334.31]	[-10402.11, -14471.98, -18643.36, -2233.65]
	Mean	-937.33	-6038.12	-1944.04	-11683.27
	Std	887.28	10026.91	736.68	6039.17
Log_jerk	All trials	[-8.91, -6.44, -6.71, -7.87]	[-8.68, -10.04, -7.88]	[-7.47, -7.8, -8.04, -7.2]	[-9.28, -8.68, -8.83, -7.71]
	Mean	-8.66	-8.66	-7.60	-8.06
	Std	0.60	1.01	0.36	0.62
Slope	All trials	[-1.99, -1.62, -1.58, -1.71]	[-1.79, -2.34, -1.91]	[-2.1, -1.67, -1.9, -1.8, -1.68]	[-1.94, -1.62, -1.97, -1.7]
	Mean	-1.62	-1.98	-1.61	-1.66
	Std	0.05	0.19	0.12	0.15
RMS	All trials	[1.1, 1.1]	[4.12, 3.1]	[2.5, 3.3]	[5.9, 7.1]
	Mean	1.25	3.33	3.20	5.00
	Std	0.43	4.03	0.98	1.41

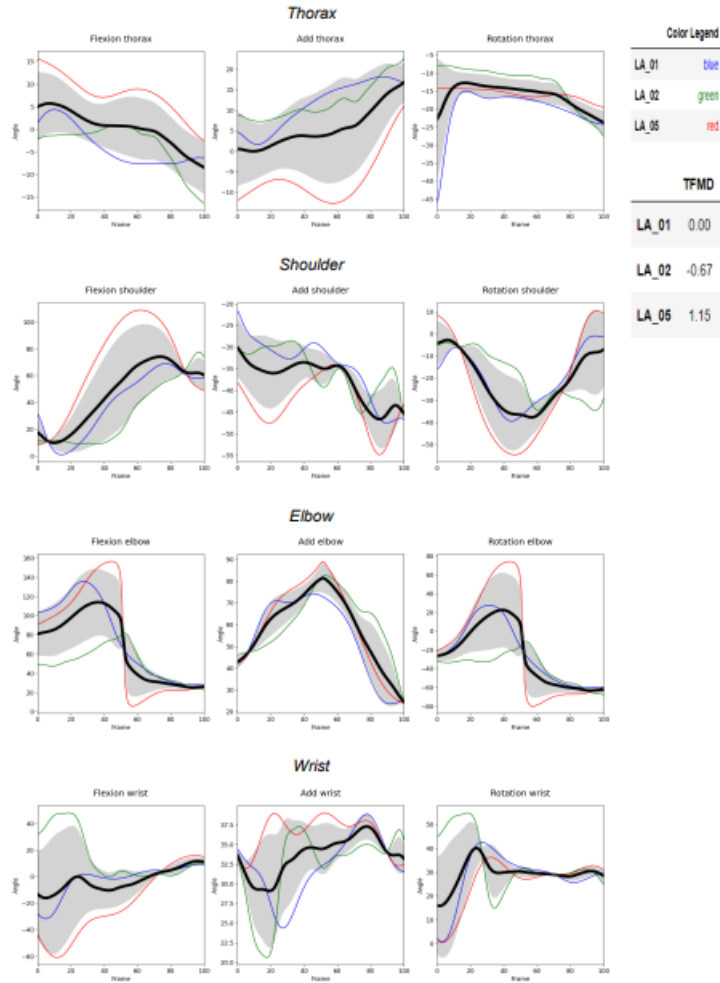
Paramètres de rectitude

		J0 - Dom	J0 - nDom	J90 - Dom	J90 - nDom
Index of curvature	All trials	[1.28, 1.17, 1.43, 1.24]	[1.27, 1.4, 2.05, 2.64, 2.23]	[1.5, 1.86, 2.28]	[1.75, 1.56, 1.28, 1.57]
	Mean	1.26	1.92	1.66	1.54
	Std	0.10	0.51	0.32	0.17

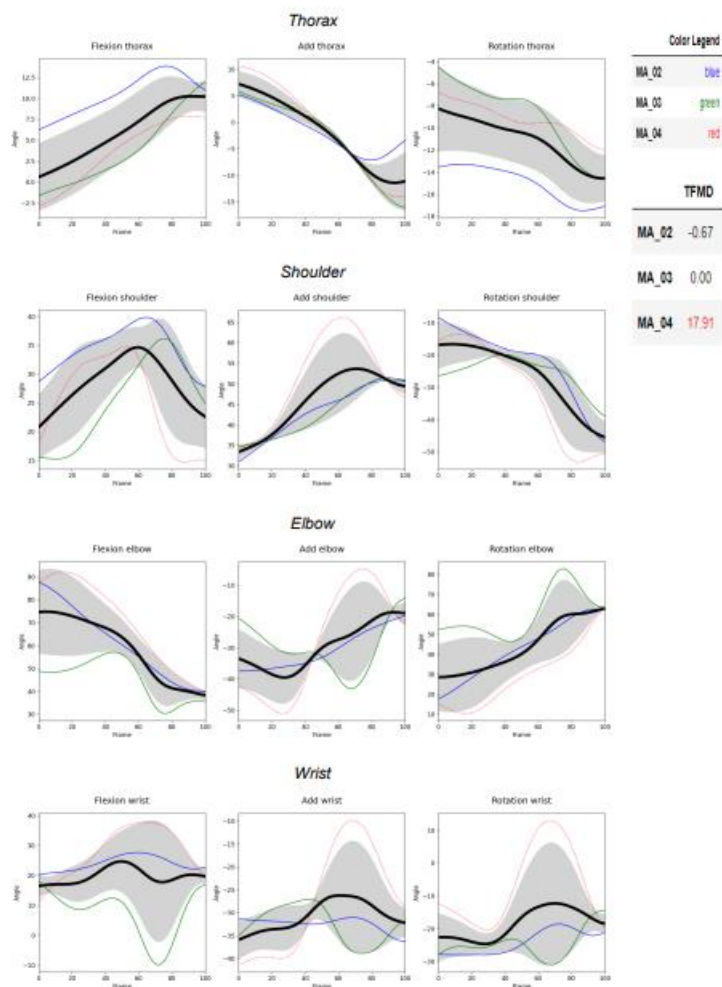
Cinématique à J0 pour membre dominant



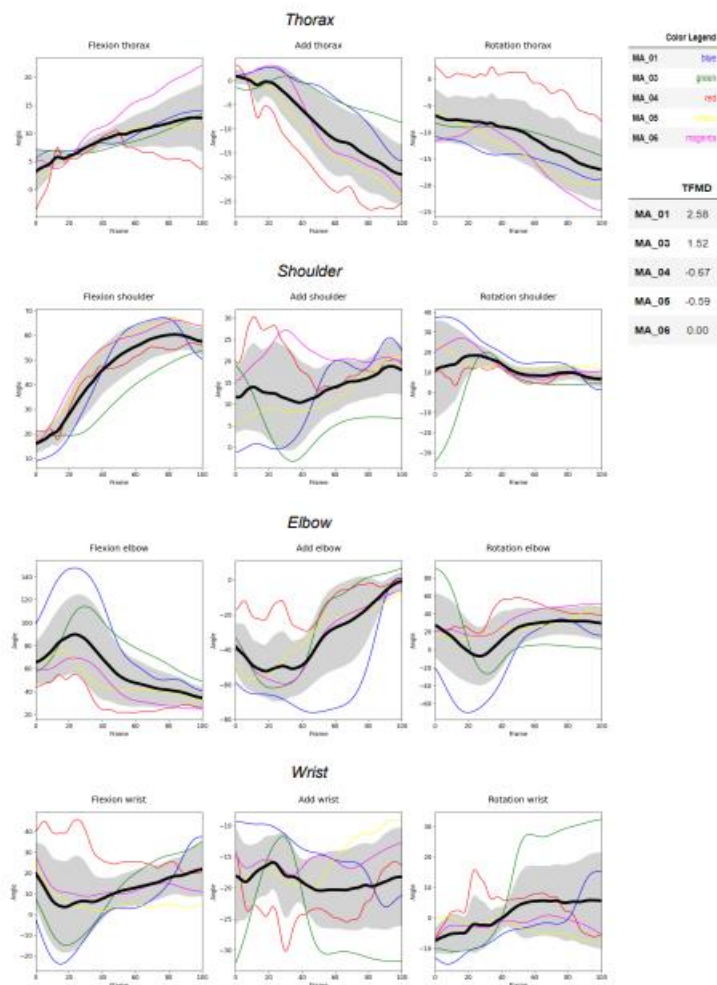
Cinématique à J90 pour le membre dominant



Cinématique à J0 pour le membre non dominant



Cinématique à J90 pour le membre non dominant



Paramètres cinématiques du tronc

		Thorax			
		J0 - Dom	J90 - Dom	J0 - nDom	J90 - nDom
ROM	All trials	[8.63, 3.75, 4.56, 6.69]	[12.01, 17.36, 18.19]	[7.59, 13.59, 10.66]	[7.19, 7.97, 14.15, 9.45, 18.4]
	Mean	5.904934	15.854989	10.615089	11.431231
	Std	1.904389	2.73712	2.448076	4.240484
MAX flexion	All trials	[-3.26, -4.91, -0.85, -4.0]	[4.36, 0.99, 15.64]	[13.84, 11.97, 7.87]	[14.01, 13.45, 10.52, 11.53, 22.15]
	Mean	-3.255804	6.998702	11.22583	14.330338
	Std	1.506635	6.263828	2.495133	4.107515

		Shoulder			
		J0 - Dom	J90 - Dom	J0 - nDom	J90 - nDom
ROM	All trials	[36.95, 34.88, 27.66, 28.41]	[58.0, 68.64, 99.69]	[12.0, 20.89, 20.06]	[58.21, 37.12, 39.27, 49.5, 49.67]
	Mean	31.974126	78.776497	17.647072	46.753772
	Std	4.017682	14.79192	4.009886	7.697368
MAX extension	All trials	[53.87, 51.68, 54.82, 53.31]	[68.94, 77.67, 108.99]	[39.81, 36.15, 34.76]	[67.07, 53.74, 56.99, 66.54, 65.99]
	Mean	53.419501	85.201894	36.905801	62.06853
	Std	1.137892	17.195576	2.132201	5.576901
MAX abduction	All trials	[-14.06, -15.18, -17.75, -13.25]	[-21.47, -28.51, -34.0]	[51.43, 50.68, 66.15]	[25.48, 19.09, 30.3, 21.0, 27.16]
	Mean	-15.060711	-27.992807	56.085845	24.606276
	Std	1.697759	5.128261	7.124757	4.07612

		Elbow			
		J0 - Dom	J90 - Dom	J0 - nDom	J90 - nDom
ROM	All trials	[76.93, 85.25, 56.57, 66.87]	[143.34, 98.33, 158.97]	[81.4, 58.67, 94.92]	[140.89, 108.8, 98.97, 73.7, 65.74]
	Mean	71.402404	133.546665	78.330194	89.618806
	Std	10.756548	25.706692	14.956978	30.851581
MAX extension	All trials	[65.04, 76.59, 51.16, 56.18]	[135.69, 81.96, 156.42]	[87.65, 57.05, 92.12]	[147.71, 114.28, 55.34, 75.78, 69.49]
	Mean	62.241666	124.690379	78.940934	92.517913
	Std	9.659285	31.374569	15.585731	33.799154
MAX supination	All trials	[-20.91, -12.06, -24.99, -21.98]	[27.35, 12.01, -10.61, 17.36, 74.18, 18.19]	[62.47, 82.71, 63.18]	[34.23, 90.96, 58.51, 44.07, 50.76]
	Mean	-19.984809	23.081106	69.454411	55.705196
	Std	4.812752	25.637223	9.37883	19.348012

		Wrist			
		J0 - Dom	J90 - Dom	J0 - nDom	J90 - nDom
ROM	All trials	[35.49, 30.25, 31.15, 37.32]	[16.87, 64.28, 18.49]	[21.41, 19.74, 40.48]	[30.62, 29.88, 49.54, 23.43, 23.98]
	Mean	33.553534	33.210735	27.211324	31.490642
	Std	2.940102	21.980023	9.407473	9.490829

