

Master of Science conjoint HES-SO - UNIL en Sciences de la santé Orientation Physiothérapie

La variabilité cinématique de la marche et ses corrélats cliniques après un accident vasculaire cérébral

Manon Tschopp

Sous la direction de
Madame Jennifer Masset, PhD
Professeure HES associée
Haute Ecole de Santé Vaud (HESAV), HES-SO

Sous la co-direction de
Monsieur Pierre Nicolo. PhD
Professeur HES assistant
Haute Ecole de Santé Genève (HEdS), HES-SO

Expert : Pr Gilles Allali, Chef de Service
Directeur du Centre Leenaards de la mémoire
Centre Hospitalier Universitaire Vaudois (CHUV)

Lausanne, HES-SO Master, 2022

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier ma directrice de travail de Master, Madame Jennifer Masset, pour sa confiance, son soutien et sa guidance avisée tout au long de ce travail. Elle a su être disponible, me guider avec bienveillance et m'aider à prendre des décisions pour chacune des étapes de ce projet.

Je remercie également mon co-directeur de travail de Master, Monsieur Pierre Nicolo. Son écoute, son regard critique et ses conseils judicieux m'ont particulièrement aidée dans la rédaction et dans les choix pratiques.

Je souhaite remercier chaleureusement Monsieur Stéphane Armand et Madame Anne Tabard, ainsi que l'équipe du laboratoire de cinésiologie des HUG. Ils ont pris le temps de me transmettre les subtilités de l'analyse quantifiée de la marche et m'ont apporté une grande aide dans la gestion et l'analyse de ma base de données.

J'adresse également mes sincères remerciements à Monsieur Sébastien Baillieul pour sa disponibilité et ses promptes réponses quant à la réalisation de l'étude HEIDI. Nos échanges m'ont aidée à répondre à un grand nombre de questions.

Je remercie aussi Monsieur Pierluigi Ballabeni pour son implication et ses précieux conseils dans la réalisation de mes statistiques.

Je tiens encore à remercier Jonathan Tam, Margaux Fumasoli et Aurélie Paley pour leur précieuse aide à la relecture et à la correction de ce travail.

Finalement, je souhaite exprimer toute ma gratitude à mes proches pour leur soutien inestimable tout au long de ce Master.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION.....	1
1.1. L'ACCIDENT VASCULAIRE CÉRÉBRAL	1
1.1.1. <i>Troubles de la marche post-AVC.....</i>	<i>1</i>
1.1.2. <i>Prise en charge en physiothérapie et récupération.....</i>	<i>2</i>
1.1.3. <i>Évaluation physiothérapeutique.....</i>	<i>2</i>
1.2. L'ANALYSE QUANTIFIÉE DE LA MARCHÉ.....	3
1.2.1. <i>Caractéristiques de la marche</i>	<i>3</i>
1.2.2. <i>Déroulement de l'AQM.....</i>	<i>4</i>
1.2.3. <i>Données cinématiques.....</i>	<i>5</i>
1.2.4. <i>Interprétation clinique des données cinématiques.....</i>	<i>6</i>
1.3. LA VARIABILITÉ DE LA MARCHÉ.....	7
1.3.1. <i>Variabilité intrinsèque et extrinsèque</i>	<i>7</i>
1.3.2. <i>État optimal de la variabilité</i>	<i>8</i>
1.3.3. <i>Variabilité post-AVC.....</i>	<i>8</i>
1.3.4. <i>Évaluation de la variabilité intrinsèque cinématique</i>	<i>9</i>
2. PROBLÉMATIQUE ET VISÉES DE L'ÉTUDE	11
2.1. JUSTIFICATION DE L'ÉTUDE.....	11
2.2. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE	12
2.3. QUESTIONS DE RECHERCHE ET HYPOTHÈSES	12
3. MÉTHODOLOGIE	13
3.1. TYPE D'ÉTUDE	13
3.2. POPULATION	13
3.2.1. <i>Sélection des participants.....</i>	<i>13</i>
3.2.2. <i>Critères d'éligibilité.....</i>	<i>13</i>
3.3. PROCÉDURES.....	15
3.3.1. <i>Visite 1 : information orale et écrite.....</i>	<i>15</i>
3.3.2. <i>Visite 2 : consentement, anamnèse et examen clinique.....</i>	<i>15</i>
3.3.3. <i>Visite 3 : évaluation cinématique de la marche.....</i>	<i>15</i>
3.4. RECUEIL DES DONNÉES.....	16
3.4.1. <i>Données de l'anamnèse.....</i>	<i>16</i>
3.4.2. <i>Données de l'examen clinique</i>	<i>16</i>

3.4.3.	<i>Données de l'AQM</i>	18
3.5.	CALCUL DE LA VARIABILITÉ INTRINSÈQUE CINÉMATIQUE	18
3.5.1.	<i>Gait Standard Deviation</i>	18
3.6.	ÉVALUATION DES SCORES CLINIQUES	19
3.6.1.	<i>Scores analytiques composites</i>	19
3.6.2.	<i>Scores fonctionnels de la marche</i>	20
3.7.	ANALYSES STATISTIQUES.....	20
4.	RÉSULTATS	21
4.1.	COMPARAISON DE LA GAITSD ENTRE LE GROUPE AVC ET LE GROUPE CONTRÔLE	25
4.2.	COMPARAISON DE LA GAITSD ENTRE LE MEMBRE INFÉRIEUR PARÉTIQUE ET NON PARÉTIQUE CHEZ LES PARTICIPANTS POST-AVC	26
4.3.	ASSOCIATIONS ENTRE LA GAITSD ET LES SCORES CLINIQUES DES PARTICIPANTS POST-AVC	28
4.3.1.	<i>Corrélations entre la GaitSD globale et les scores fonctionnels de la marche</i>	28
4.3.2.	<i>Corrélations entre la GaitSD du côté parétique et les scores analytiques composites.</i> ..	30
5.	DISCUSSION	30
5.1.	VARIABILITÉ GLOBALE DES PATIENTS POST-AVC PAR RAPPORT À DES PARTICIPANTS CONTRÔLES	31
5.2.	VARIABILITÉ DU MEMBRE INFÉRIEUR PARÉTIQUE VERSUS NON PARÉTIQUE DES INDIVIDUS POST-AVC	32
5.3.	ASSOCIATIONS ENTRE LA VARIABILITÉ ET LES SCORES CLINIQUES	33
5.4.	LIMITES DE L'ÉTUDE.....	35
5.5.	IMPLICATIONS FUTURES.....	36
5.5.1.	<i>Perspectives cliniques</i>	36
5.5.2.	<i>Propositions de recherche</i>	37
6.	CONCLUSION	38
	RÉFÉRENCES.....	39
	ANNEXES.....	I
	ANNEXE 1 : ÉVALUATION DE LA VARIABILITÉ CINÉMATIQUE	I
	ANNEXE 2 : SCORES COMPOSITES	II

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques démographiques, anthropométriques, ainsi que l'incidence des chutes, le statut cognitif des participants de l'étude et les caractéristiques de la lésion des participants post-AVC.....	21
Tableau 2 : Caractéristiques individuelles démographiques, anthropométriques, ainsi que l'incidence des chutes, le statut cognitif et les caractéristiques de la lésion des participants du groupe AVC.....	22
Tableau 3 : Scores cliniques des participants de l'étude.	23
Tableau 4 : Scores cliniques des participants du groupe AVC.	24
Tableau 5 : GaitSD des participants de l'étude.	24
Tableau 6 : GaitSD des participants du groupe AVC.	25

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Illustration des différentes phases constituant le cycle de marche pour le membre inférieur droit	4
Figure 2 : Graphiques représentant les courbes cinématiques (°) du bassin, de la hanche, du genou et de la cheville dans les 3 plans chez un patient avec une hémiplegie gauche et marchant pieds nus sans appui	6
Figure 3 : Moyenne et déviation standard pour la GaitSD.....	10
Figure 4 : Placement des marqueurs réfléchissants passifs selon le modèle Plug-in-Gait .	16
Figure 5 : Représentation graphique de la GaitSD globale du groupe AVC et de la GaitSD globale du groupe contrôle.....	25
Figure 6 : Représentation de la GaitSD des participants de l'étude et des valeurs seuils	26
Figure 7 : Représentation graphique de la GaitSD du MI parétique et du MI non parétique pour le groupe AVC.....	27
Figure 8 : Représentation individuelle de la mesure de la GaitSD du MI parétique et du MI non parétique chez les participants du groupe AVC.	27
Figure 9 : Graphique de corrélation de la GaitSD avec la vitesse de marche (10MWT).	28
Figure 10 : Graphique de corrélation de la GaitSD avec le GDI.	29
Figure 11 : Graphiques de corrélation de la GaitSD avec le nFAC et le 6MWT.....	29
Figure 12 : Graphiques de corrélation de la GaitSD avec les scores cliniques analytiques des participants du groupe AVC.....	30

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AQM	Analyse quantifiée de la marche
AVC	Accident vasculaire cérébral
CT	Contact du talon
CV	Coefficient de variation
DA	Double appui
DO	Décollement des orteils
EVA	Echelle visuelle analogique
FAC	<i>Functional Ambulation Categories</i>
GaitSD	<i>Gait Standard Deviation</i>
GDI	Indice de déviation de la marche (<i>Gait Deviation Index</i>)
GVI	<i>Gait Variability Index</i>
HAS	Haute Autorité de Santé
HEIDI	<i>HEmpiparesis I</i> nter-limb coordination and <i>D</i> ual task <i>I</i> nterference
HUG	Hôpitaux Universitaires de Genève
IMC	Indice de masse corporelle
LCWT	Laboratoire de cinésiologie Willy Taillard
MAS	Echelle d'Ashworth modifiée (<i>Modified Ashworth Scale</i>)
MI	Membre inférieur
MMSE	<i>Mini-Mental State Examination</i>
MRC	<i>Medical Research Council</i>
nFAC	<i>New Functional Ambulation Classification</i>
NR	Non réalisable
NS	Non significatif
OBSAN	Observatoire suisse de la santé
OMS	Organisation mondiale de la santé
PCA	Analyse en composantes principales
RMSD	Déviatiqn quadratique moyenne (<i>Root Mean Square Deviation</i>)
ROM	Amplitude de mouvement (<i>range of motion</i>)
SD	Déviatiqn standard
6MWT	Test de marche de 6 minutes (<i>6 Minute Walk Test</i>)
10MWT	Test de marche de 10 mètres (<i>10 Meters Walk Test</i>)

RÉSUMÉ

Introduction : À la suite d'un accident vasculaire cérébral (AVC), la cinématique de la marche est altérée et une plus grande variabilité spatio-temporelle a été retrouvée. Peu d'études ont investigué la variabilité cinématique de la marche et ses corrélats cliniques chez les patients post-AVC.

Objectifs : 1) Déterminer la variabilité cinématique des membres inférieurs des patients post-AVC comparativement à des participants « contrôles ». 2) Comparer la variabilité cinématique du membre inférieur parétique au membre inférieur non parétique chez les patients post-AVC. 3) Investiguer s'il existe une association entre la variabilité cinématique et les scores cliniques chez les personnes post-AVC.

Méthode : Cette étude exploratoire inclut 12 patients en phase chronique d'un AVC et 10 participants « contrôles ». Pour analyser la variabilité cinématique, la *Gait Standard Deviation* (GaitSD) a été recueillie pour un minimum de six cycles de marche. Pour examiner les corrélations avec les scores cliniques, les tests de 10 mètres (10MWT), 6 minutes, *new Functional Ambulation Classification*, l'indice de déviation de la marche (GDI) et les scores composites de force, spasticité, amplitude de mouvement et sensibilité ont été recueillis.

Résultats : La GaitSD globale est plus élevée pour les patients post-AVC (1.84°, Q1-Q3 1.43-2.04) comparativement aux participants « contrôles » (1.36°, Q1-Q3 1.17-1.52) ($p < 0.01$). Dans le groupe AVC, la GaitSD du côté parétique (1.90°, Q1-Q3 1.53-2.20) n'est pas différente du côté non parétique (1.63°, Q1-Q3 1.47-2.06) ($p = 0.09$). Les corrélations réalisées avec les scores cliniques indiquent que la GaitSD est associée au 10MWT ($r = 0.65$, $p = 0.02$) et au GDI ($r = 0.76$, $p < 0.01$).

Conclusion : L'augmentation de la variabilité cinématique des deux membres inférieurs suggère des déficits du côté parétique et des mécanismes compensatoires du côté non parétique chez les patients post-AVC. De futures études seraient nécessaires pour confirmer ces résultats et évaluer l'effet d'interventions thérapeutiques sur cette variabilité.

ABSTRACT

Introduction : Following a stroke, gait kinematics are altered and increased spatio-temporal variability has been found. Few studies have investigated kinematic gait variability and its clinical correlates in post-stroke patients.

Aims : 1) To determine the kinematic variability of the lower limbs of post-stroke patients compared to control participants. 2) To compare the kinematic variability of the paretic lower limb to the non-paretic lower limb in post-stroke patients. 3) To investigate whether there is an association between kinematic variability and clinical scores in post-stroke patients.

Method : This exploratory study included 12 chronic stroke patients and 10 control participants. To analyse kinematic variability, Gait Standard Deviation (GaitSD) was collected for a minimum of six gait cycles. To examine correlations with clinical scores, the 10 Meters Walk Test (10MWT), 6 Minute Walk Test, new Functional Ambulation Classification, Gait Deviation Index (GDI) and composite scores for strength, spasticity, range of motion and sensitivity were collected.

Results : GaitSD for post-stroke patients (1.84°, Q1-Q3 1.43-2.04) is higher compared to control participants (1.36°, Q1-Q3 1.17-1.52) ($p<0.01$). In the stroke group, GaitSD for the paretic side (1.90°, Q1-Q3 1.53-2.20) is not different from the non-paretic side (1.63°, Q1-Q3 1.47-2.06) ($p=0.09$). Correlations with clinical scores indicate that GaitSD is associated with 10MWT ($r=0.65$, $p=0.02$) and GDI ($r=0.76$, $p<0.01$).

Conclusion : The increased kinematic variability in both lower limbs suggests deficits of the paretic side and compensatory mechanisms of the non-paretic side in post-stroke patients. Future studies are needed to confirm these results and to evaluate the effect of therapeutic interventions on this variability.

1. Introduction

1.1. L'accident vasculaire cérébral

L'accident vasculaire cérébral (AVC) se définit comme « l'interruption de la circulation sanguine dans le cerveau, en général quand un vaisseau sanguin éclate (hémorragique) ou est bloqué par un caillot (ischémique). L'apport en oxygène et en nutriments est stoppé, ce qui endommage les tissus cérébraux » (Organisation mondiale de la Santé [OMS], 2021).

L'AVC est la deuxième cause majeure de décès et d'invalidité à travers le monde, affectant 13 millions de personnes chaque année (Lindsay et al., 2019). En Suisse, cela représente 20'000 nouveaux cas par an (Observatoire suisse de la santé [OBSAN], 2021). Le taux de létalité ayant diminué grâce à une prise en charge efficiente dans les *Stroke Centers* et *Stroke Units* nouvellement développés, le nombre d'individus conservant des séquelles fonctionnelles demeure important. En raison du vieillissement de la population et de l'incidence croissante de cette pathologie, le nombre de patients à prendre en charge va augmenter proportionnellement (Mühl & Vuadens, 2011; OBSAN, 2021; OMS, 2021b).

Après un AVC, la déficience la plus courante et la plus largement reconnue est la déficience motrice (Haute Autorité de Santé [HAS], 2012; Pollock et al., 2014). Elle peut être considérée comme une perte ou une limitation de la fonction de contrôle musculaire ou de mouvement. Celle-ci affecte généralement le contrôle des mouvements du visage, du membre supérieur et du membre inférieur (MI) d'un côté du corps chez environ 80% des patients (Pollock et al., 2014). Elle peut s'accompagner de spasticité, de perte sensorielle, proprioceptive et/ou d'ataxie (Sheffler & Chae, 2015). Ces déficits engendrent des limitations de mobilité et ont un impact significatif sur la capacité de marche car même les personnes qui parviennent à se déplacer de manière autonome peuvent présenter des déficits persistants (Wonsetler & Bowden, 2017). De ce fait, les conséquences de l'AVC représentent un enjeu important pour la société (OMS, 2021b). La durée des soins après un AVC est longue, le coût économique qui en résulte élevé et la qualité de vie de cette population s'en voit impactée (Mühl & Vuadens, 2011).

1.1.1. *Troubles de la marche post-AVC*

Septante-cinq pour cent des personnes ayant eu un AVC présentent des limitations à la marche et adoptent généralement une marche de type « hémiparétique » (Sheffler & Chae, 2015). Elle se caractérise par un schéma de marche asymétrique avec une faiblesse motrice du côté parétique, des réactions d'équilibration perturbées, une diminution de la mise en charge sur le MI parétique et une diminution de la progression du corps vers l'avant. Par ailleurs, des schémas locomoteurs primitifs peuvent apparaître du côté parétique tels qu'une

synergie des extenseurs des membres inférieurs (extension de la hanche, extension du genou, adduction de la hanche, flexion plantaire et inversion de la cheville) qui nécessitent des ajustements compensatoires du bassin et du côté non parétique afin d'augmenter la stabilité posturale lors de la marche (Balaban & Tok, 2014; Sheffler & Chae, 2015). Les personnes post-AVC présentent également une augmentation du coût énergétique, raison pour laquelle, afin de réduire ce coût, elles diminuent leur vitesse de marche (Sheffler & Chae, 2015). On retrouve ainsi des changements caractéristiques dans les paramètres spatio-temporels, cinématiques et cinétiques et une plus grande variabilité de la marche inter-cycles comparativement aux individus sains (Balaban & Tok, 2014; Sheffler & Chae, 2015).

Les troubles de la marche sont donc un problème majeur pour de nombreuses personnes post-AVC. Ils engendrent des difficultés dans la réalisation des activités de la vie quotidienne et augmentent le risque de chute (Beyaert et al., 2015).

1.1.2. Prise en charge en physiothérapie et récupération

La récupération de la marche tient une place fondamentale dans la réadaptation des personnes victimes d'un AVC (Pollock et al., 2014; Wonsetler & Bowden, 2017). Elle est recommandée dès que possible et doit être poursuivie tout au long de l'évolution de l'AVC pour permettre au patient de restaurer un maximum d'indépendance et de se déplacer de la manière la plus sécuritaire et économique possible (grade B) (HAS, 2012).

La prise en charge active, répétitive et spécifique stimule la plasticité cérébrale et favorise une récupération fonctionnelle associée (HAS, 2012). Celle-ci comprend quatre phases, qui se succèdent les unes aux autres mais ne sont pas clairement délimitées : la phase hyperaiguë (de 0 à 24 heures), la phase aiguë (de 24 heures à 3 mois), la phase subaiguë (de 3 à 6 mois) et la phase chronique (supérieure à 6 mois) (Ballester et al., 2019; Veerbeek et al., 2014). Le processus de récupération n'est pas linéaire, mais suit une courbe exponentielle les premiers jours avant de s'aplatir les semaines suivantes et d'atteindre un plateau vers six mois (Langhorne et al., 2011). Il est tout de même possible d'augmenter le taux de récupération fonctionnelle une fois la phase chronique atteinte (Ballester et al., 2019). À ce stade, le soutien et les conseils au patient sont recommandés dans le but d'aider le processus d'adaptation, d'optimiser le fonctionnement social et d'apprendre à faire face aux limitations, de préserver la condition, l'aptitude physique et de surveiller la qualité de vie (Ballester et al., 2019; Veerbeek et al., 2014) .

1.1.3. Évaluation physiothérapeutique

Tout individu victime d'un AVC est systématiquement évalué en termes de fonctions organiques, de structures anatomiques, d'activités et de participation avant le début de sa

prise en charge en physiothérapie puis tout au long de son processus de rééducation afin de suivre objectivement son évolution clinique et d'ajuster les objectifs fonctionnels (OMS, 2001; Veerbeek et al., 2014). La capacité de marche est un élément fondamental de l'évaluation physiothérapeutique (HAS, 2012; Veerbeek et al., 2014). Elle s'apprécie sur des critères qualitatifs (allure, égalité du pas, description de la position des différents segments du corps lors des différentes phases de marche, etc.) et quantitatifs (vitesse de marche, distance maximale parcourue, etc.) (HAS, 2012).

L'utilisation de mesures fiables, valides et adaptées est préférable (HAS, 2012; Veerbeek et al., 2014). Le physiothérapeute dispose ainsi d'instruments de mesure de base comme le test de marche de 10 mètres (10MWT) à vitesse choisie pour évaluer la vitesse de marche et le *Functional Ambulation Categories* (FAC) pour évaluer la capacité de marche (Veerbeek et al., 2014). D'autres tests peuvent également être réalisés pour compléter l'évaluation de base en fonction du problème du patient et de ses objectifs (Veerbeek et al., 2014). Par exemple, le test de marche de 6 minutes (6MWT) est un test effectué à une intensité sous-maximale. Il permet d'évaluer la capacité aérobie et l'endurance du patient post-AVC (Shirley Ryan AbilityLab, 2021).

L'utilisation d'outils d'évaluation permettra notamment d'établir un pronostic de récupération de la marche, d'appuyer l'argumentation clinique du physiothérapeute et d'améliorer la continuité des soins aux patients victimes d'AVC (Veerbeek et al., 2014). Toutefois, lorsque les troubles de la marche sont complexes, la réalisation d'une analyse quantifiée de la marche (AQM) pourra être demandée afin de fournir des informations complémentaires (Armand et al., 2015).

1.2. L'analyse quantifiée de la marche

L'analyse quantifiée de la marche est un examen clinique visant à caractériser de manière quantitative la marche d'une personne avec des troubles locomoteurs (Carcreff et al., 2016). Elle consiste à mesurer, en laboratoire, le mouvement en trois dimensions des articulations et des segments corporels, les forces qui s'appliquent et l'activité électromyographique des muscles (Armand et al., 2015). L'AQM cherche de cette manière à identifier les défauts de la marche et leurs causes possibles afin d'orienter le choix thérapeutique (Armand et al., 2015; Carcreff et al., 2016).

1.2.1. *Caractéristiques de la marche*

La marche est « une activité cyclique contribuant au déplacement du corps dans l'espace » (Carcreff et al., 2016, p.1). Elle permet un découpage en cycle commençant généralement par le contact d'un pied au sol et finissant par le contact subséquent de ce même pied. Un cycle

de marche comprend ainsi une phase oscillante (environ 40%) et une phase d'appui (environ 60%) des membres inférieurs (Figure 1) (Armand et al., 2015; Baker, 2013).

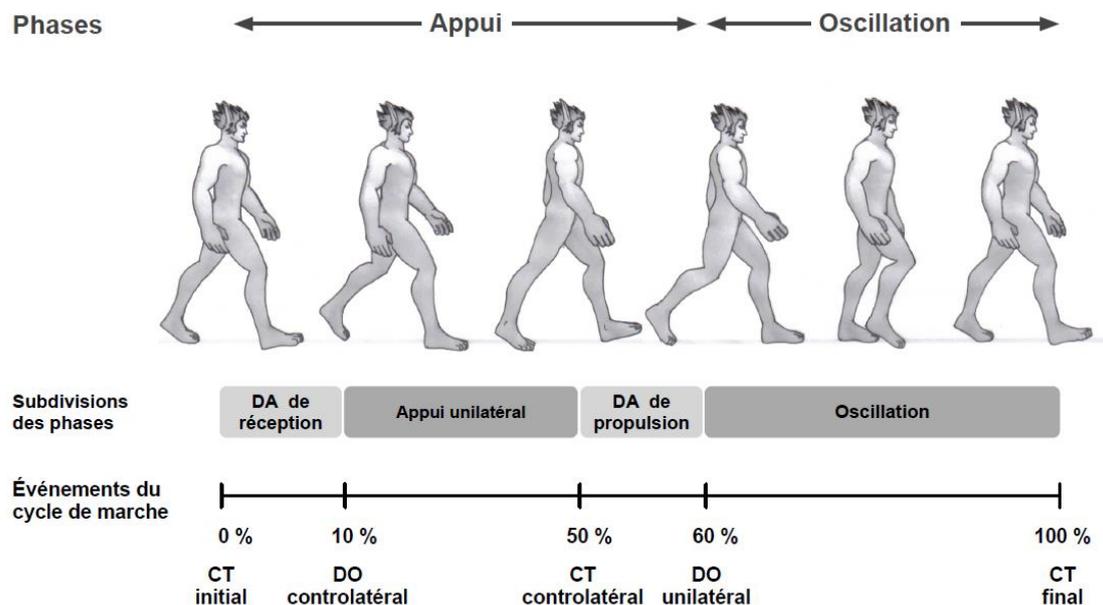


Figure 1 : Illustration des différentes phases constituant le cycle de marche pour le membre inférieur droit. Abréviations : DA=doublé appui ; CT=contact du talon ; DO=décollement des orteils. Tiré de : Fusco, 2008.

Chaque cycle de marche peut être envisagé comme représentatif de la façon dont une personne se déplace, et la comparaison d'un certain nombre de cycles peut être considérée comme une indication de la variabilité de ce modèle (Baker, 2013). La marche est optimale lorsqu'elle se traduit par une symétrie, une stabilité et une efficacité énergétique maximales (Sheffler & Chae, 2015). Elle est considérée comme pathologique lorsque le système neuro-musculo-squelettique est altéré et qu'il rend son exécution difficile ou douloureuse (Armand et al., 2015).

1.2.2. Déroulement de l'AQM

L'analyse se déroule généralement dans une salle spécifique disposant d'une piste de marche d'environ dix mètres, de caméras vidéo, d'un système optoélectronique pour les données cinématiques, de plateformes de force pour les données cinétiques, d'électrodes d'électromyographie pour les données sur l'activité musculaire et d'un tapis de pression plantaire pour étudier le contact du pied avec le sol (Carcreff et al., 2016).

La réalisation doit être standardisée et suivre les étapes suivantes : la préparation du laboratoire et du dossier du patient, l'accueil du patient, l'examen clinique, l'équipement du patient et les enregistrements des trajectoires des marqueurs (Carcreff et al., 2016).

1.2.3. Données cinématiques

La cinématique vise à décrire « le mouvement linéaire et angulaire du corps sans tenir compte des forces (internes et externes) qui induisent le mouvement » (Carcreff et al., 2016, p.3). L'utilisation d'un système optoélectronique demeure la référence pour mesurer les données cinématiques. Pour obtenir les coordonnées spatiales tri-dimensionnelles d'un point donné au cours du temps, des marqueurs réfléchissants passifs sont disposés sur la peau et seront détectés par au moins deux caméras afin de reconstruire la position 3D (x , y , z) de ces marqueurs. La cinématique est ensuite représentée sous forme de graphiques en fonction du pourcentage du cycle de marche. Les courbes des articulations et des segments sont finalement étudiées selon 3 plans (sagittal, frontal et transversal) (Carcreff et al., 2016).

L'analyse et la compréhension de la cinématique de la marche normale semblent indispensables à l'étude de la marche post-AVC (Fusco, 2008). De ce fait, la cinématique sera d'abord décrite chez des individus sains, puis chez des patients post-AVC (Figure 2).

Chez les individus sains, la hanche alterne une extension et une flexion par cycle de marche. Une flexion de hanche de 15° apparaît lors du contact du talon puis une extension maximale de 10° est atteinte en fin de propulsion. La hanche se fléchit de nouveau lors de la phase oscillante et atteint un pic de flexion à 45° . Au niveau du genou, les individus sains présentent deux pics de flexion au cours du cycle de marche. Ils présentent une extension de 0° lors du contact du talon, puis une première flexion de 20° au début de la phase d'appui avant de revenir tendu jusqu'au décollement du talon. Le genou fléchit ensuite à nouveau pour atteindre une flexion maximale de 70° au début de la phase d'oscillation. Au niveau de la cheville, les individus sains présentent un pied en position neutre de 0° lors du contact du talon, une flexion plantaire au début de la phase d'appui puis une flexion dorsale de 10° jusqu'au décollement du talon. La cheville réalise ensuite une flexion plantaire de 15° au début de la phase d'oscillation et revient finalement en position neutre (Balaban & Tok, 2014; Fusco, 2008).

Les patients post-AVC, en comparaison des individus sains, présentent généralement une diminution de la flexion de hanche lors de l'oscillation et un manque d'extension de hanche en fin de phase d'appui. Au niveau du genou, une flexion accrue ou un recurvatum apparaît lors de la phase d'appui et une diminution de la flexion lors de la phase oscillante. La cheville présente un excès de flexion plantaire lors de la phase oscillante (pied tombant, équin) et un manque de flexion plantaire lors de la propulsion (Balaban & Tok, 2014; Fusco, 2008).

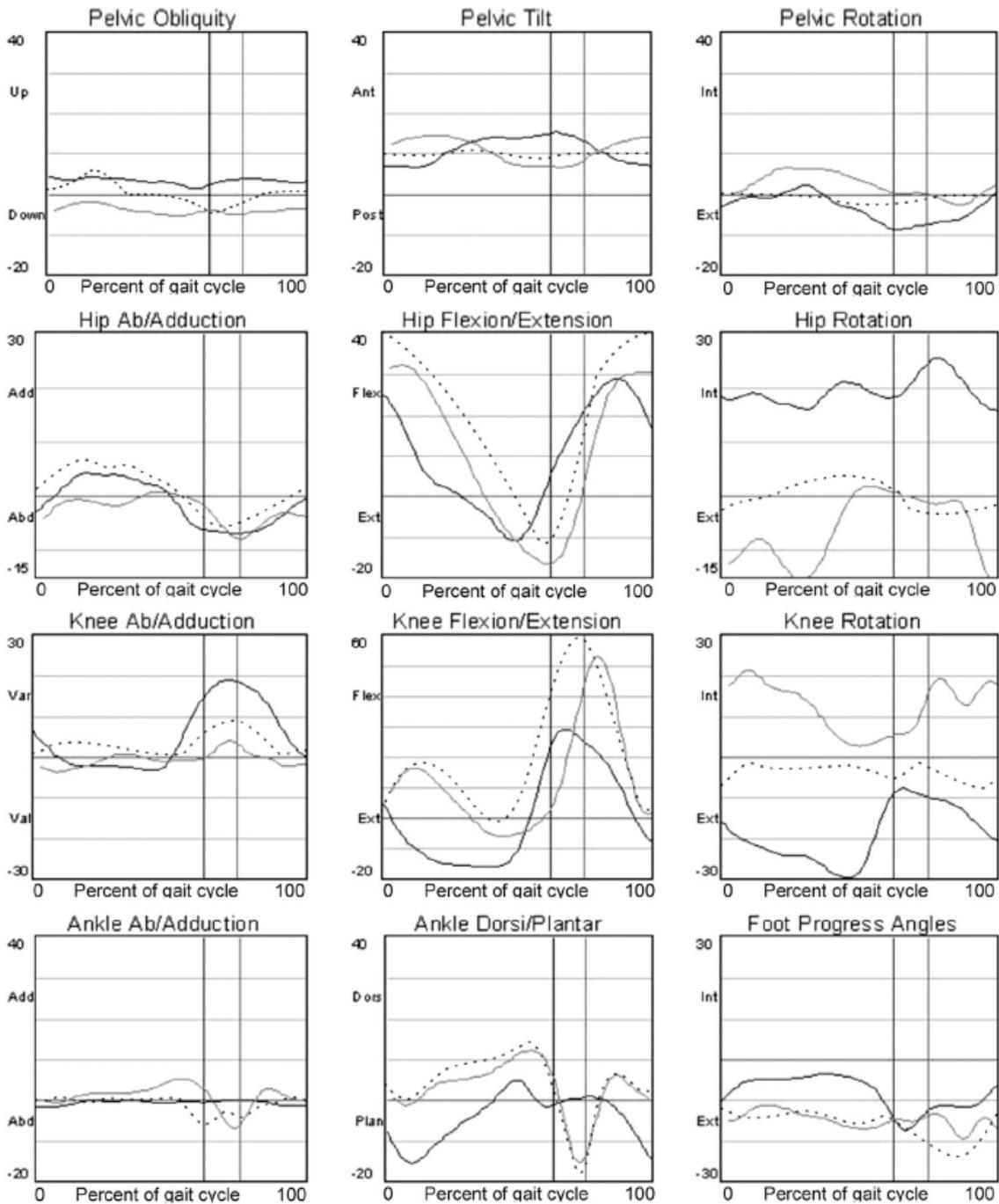


Figure 2 : Graphiques représentant les courbes cinématiques (°) du bassin, de la hanche, du genou et de la cheville dans les 3 plans chez un patient avec une hémiplégie gauche et marchant pieds nus sans appui. Ligne foncée=côté gauche, ligne claire=côté droit, pointillés=norme. Tiré de : Balaban & Tok, 2014.

1.2.4. Interprétation clinique des données cinématiques

L'ensemble des données cinématiques de l'AQM est généralement regroupé dans un rapport écrit et discuté au sein d'une équipe pluridisciplinaire pour interpréter la marche du patient

(Armand et al., 2015; Carcreff et al., 2016). La déduction des causes probables des défauts observés est réalisée en mettant en lien les différentes données du mouvement entre elles ainsi que les données cliniques. Cette étape est cruciale car elle permet de différencier les déficiences primaires des stratégies compensatoires et d'ainsi définir un traitement adéquat (Armand et al., 2015). Elle permet également d'évaluer l'efficacité des interventions réalisées (Bouharham et al., 2013). Bien que la fiabilité des paramètres de l'AQM est bonne et le degré d'erreur acceptable, l'interprétation des résultats devra tenir compte des différents facteurs d'influence telle que la variabilité cinématique intrinsèque et extrinsèque (Armand et al., 2015; Bouharham et al., 2013).

1.3. La variabilité de la marche

1.3.1. *Variabilité intrinsèque et extrinsèque*

Dans l'AQM, la variabilité est généralement considérée comme la fluctuation de la valeur d'une mesure cinématique, cinétique, spatio-temporelle ou électromyographique. Cette fluctuation peut être observée dans les mesures répétées, entre ou chez les individus ou les évaluateurs, entre les différentes mesures, interventions ou conditions de santé. La source des fluctuations peut être extrinsèque (ou externe) et/ou intrinsèque (ou interne) (Chau et al., 2005).

La variabilité extrinsèque provient de divers facteurs externes à l'individu. Elle peut être causée par l'environnement physique (par ex. la surface de marche), par l'instrumentation employée et les moyens auxiliaires présents (par ex. les cannes, les attelles de cheville et les différentes semelles de chaussures) ainsi que par la méthode de mesure utilisée (par ex. une différence de placement des marqueurs entre les essais et les évaluateurs) (Chau et al., 2005).

La variabilité intrinsèque est une caractéristique courante du mouvement humain et décrit les variations physiologiques qui se produisent dans la performance motrice lors de multiples répétitions d'une tâche (Stergiou & Decker, 2011). Ces fluctuations naturelles sont tributaires du système neurologique, métabolique et musculosquelettique. Elles sont influencées par l'âge et la présence de conditions pathologiques. Dans le cas de pathologies neurologiques, la marche peut être affectée par une perte de force, des troubles de sensibilité ou de tonus (Chau et al., 2005). Différents facteurs internes peuvent également influencer le schéma de marche des patients post-AVC tels que le manque de confiance, la fatigue, la dépression et le manque de condition physique (Bouharham et al., 2013; Schwartz et al., 2004). La vitesse de marche est également un facteur d'influence à prendre en compte (Dingwell & Marin, 2006).

Les différentes sources de variabilité doivent être prises en considération car elles peuvent influencer l'interprétation des résultats de l'AQM et entraîner des divergences dans les recommandations de traitement (Bouharham et al., 2013; Chau et al., 2005). Le clinicien devra

donc tenir compte de ces différents aspects pour que son interprétation soit la plus adéquate possible.

Ce travail s'intéressera à la variabilité intrinsèque (intra-séance et inter-cycles). De ce fait, lorsque le terme « variabilité » sera utilisé sans précision, il s'agira de la variabilité intrinsèque.

1.3.2. État optimal de la variabilité

L'acquisition d'un mouvement complexe comme la marche n'implique pas seulement le développement d'un modèle de mouvement adéquat, mais aussi le développement d'une certaine variabilité optimale de ce modèle (J. Dingwell et al., 2001; Riley & Turvey, 2002; Srinivasan & Mathiassen, 2012). Selon Stergiou et Decker (2011), l'état optimal de la variabilité du mouvement montre que le système biologique est en bonne santé et reflète son adaptabilité. La variabilité optimale se situe entre deux limites : la variabilité au-delà de la limite supérieure implique que le système est trop instable et sensible aux perturbations (ex. une personne âgée avec un risque de chute accru) ; la variabilité en dessous de la limite inférieure indique que le système est trop stéréotypé, moins susceptible de présenter un comportement exploratoire et donc moins capable de s'adapter aux perturbations (ex. robotique) (Stergiou et al., 2006). Ces deux situations entraînent une diminution de l'adaptabilité aux perturbations et sont associées à un état sous-optimal (Stergiou & Decker, 2011). Dans un laboratoire où les conditions environnementales sont stables, les mesures reflètent principalement les altérations dans les schémas de mouvement (Wonsetler & Bowden, 2017). Chez les adultes sains, la variabilité inter-cycles est généralement faible indiquant un bon fonctionnement des systèmes régulant la marche. Quand les systèmes sont altérés dû à certaines atteintes, la variabilité inter-cycles est habituellement augmentée reflétant une marche moins stable et pathologique (Hausdorff, 2005).

1.3.3. Variabilité post-AVC

La variabilité intrinsèque de la marche a été principalement étudiée sur la base des paramètres spatio-temporels. Par exemple, l'étude de Guzik et al. (2019) montre que la variabilité est augmentée de manière globale pour les personnes ayant subi un AVC comparativement aux individus sains. Balasubramanian et al. (2009) décrivent notamment une augmentation de la variabilité de la longueur du pas, de la cadence, du DA de propulsion et de l'oscillation, à l'exception de la largeur du pas, chez les personnes post-AVC. À l'inverse, lorsque les paramètres spatio-temporels des personnes post-AVC augmentent, la variabilité est diminuée, ce qui n'est pas le cas des individus sains (Boudarham et al., 2013; Chisholm et al., 2014). Cette réduction de la variabilité inter-cycles suggérerait une amélioration de la stabilité de la marche et une diminution de la peur de chuter des personnes post-AVC (Boudarham et al., 2013). Concernant la comparaison entre les membres inférieurs des personnes victimes d'un

AVC, le MI parétique est ressorti globalement plus variable que le MI non parétique (Guzik et al., 2019). La variabilité du temps d'oscillation et du DA de propulsion était plus grande du côté parétique par rapport au côté non parétique, suggérant une association directe entre la déficience sous-jacente du MI parétique et la variabilité du pas. Il n'y avait par contre pas de différence dans la variabilité entre les longueurs de pas parétiques et non parétiques (Balasubramanian et al., 2009).

La variabilité intrinsèque cinématique de la marche des personnes post-AVC demeure quant à elle peu étudiée. Boudarham et al. (2013) décrivent une augmentation de la variabilité cinématique des personnes post-AVC en comparaison aux individus sains. Ils relèvent notamment des changements sur 9 cycles de marche d'une AQM chez les personnes ayant eu un AVC et suggèrent de retirer les trois premiers cycles de l'AQM afin d'exclure la phase d'adaptation nécessaire à cette population (Boudarham et al., 2013). Concernant la comparaison entre les membres inférieurs, Fotiadou et al. (2018) décrivent une augmentation de la variabilité de la plupart des paramètres cinématiques du côté non parétique des personnes post-AVC. Ils constatent principalement une variabilité augmentée au niveau des angles de rotation et d'abduction-adduction de la hanche du côté non parétique par rapport au côté parétique. Les auteurs supposent que la spasticité serait la cause de restrictions de mouvement du MI parétique tandis que le MI non parétique aurait plus de capacité de compensation. Le MI non parétique doit faire plus de corrections fonctionnelles pour contrebalancer les déficiences du MI parétique en augmentant sa variabilité (Fotiadou et al., 2018).

1.3.4. Évaluation de la variabilité intrinsèque cinématique

La mesure de la variabilité de la marche est intéressante car elle peut être sensible pour fournir un indice clinique de l'instabilité de la marche et du risque de chute (Hausdorff, 2005; Kim et al., 2021). De nombreux indices statistiques existent pour mesurer la variabilité intrinsèque cinématique (Annexe 1) (Chau et al., 2005; Di Marco et al., 2018; Sangeux et al., 2016). En voici quelques exemples :

- Déviation standard (SD) et coefficient de variation (CV)

La SD est « la racine carrée de la variance » et le CV mesure « la dispersion des données autour de la moyenne » (Spiegel et al., 1972; Winter, 1984). Ces mesures permettent de déterminer la « quantité » de variabilité en fonction des différences d'amplitudes retrouvées. Cependant, elles ne sont pas sensibles aux changements dans le temps et nécessitent au moins 15 cycles de marche pour être fiables (Estep et al., 2018; Sangeux et al., 2016).

- Déviation quadratique moyenne (RMSD)

La déviation quadratique moyenne représente « la racine carrée de la variance, évaluée échantillon par échantillon, entre les courbes et la courbe moyenne sur le cycle de la marche » [Traduction libre] (JCGM, 2008, 2012). Un score est fourni pour chacune des variables cinématiques. Néanmoins, les RMSD des variables cinématiques semblent être corrélées avec une relativement forte interaction entre elles (Rutz, 2021).

- *Gait Standard Deviation (GaitSD)*

La GaitSD est « la racine carrée de la variance moyenne sur les variances des variables cinématiques (moyenne/ score des déviations standards) » [Traduction libre] (Sangeux et al., 2016). Elle permet de mesurer la variabilité globale d'une personne pendant la marche en un seul score (Sangeux et al., 2016). Un avantage de l'utilisation de ce score composé réside dans le fait qu'il est peu sensible au nombre de cycles. En effet, la moyenne de la GaitSD pour 5 cycles est égale à la moyenne de la GaitSD pour 30 cycles et l'écart type de la GaitSD tend également à diminuer à partir de 5 cycles pour les individus sains (Figure 3) (Sangeux et al., 2016).

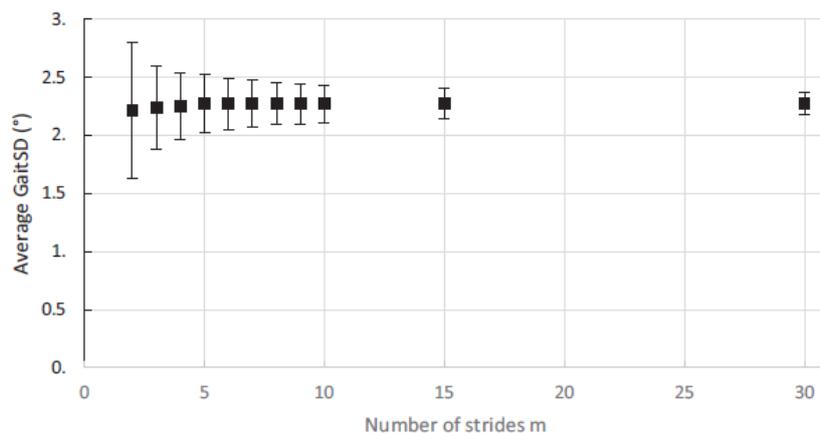


Figure 3 : Moyenne et déviation standard pour la GaitSD. Tiré de : Sangeux et al., 2016.

Afin d'obtenir une précision et marge d'erreur en dessous de 10%, Sangeux et ses collaborateurs (2016) préconisent toutefois de recueillir un minimum de six cycles pour des individus sains. Ces résultats sont en adéquation avec ceux relevés par Rutz (2021) pour des enfants et jeunes adultes atteints de paralysie cérébrale. Ainsi, la distance de marche est réduite, ce qui évite un effet de la fatigue musculaire sur la qualité de marche et l'analyse de la variabilité (Rutz, 2021; Sangeux et al., 2016).

2. Problématique et visées de l'étude

2.1. Justification de l'étude

La marche est le mode de locomotion le plus naturel chez l'homme et permet de se déplacer de manière autonome et économe (Armand et al., 2015). Or, septante-cinq pour cent des personnes ayant eu un AVC présentent des déficits sensori-moteurs au niveau du MI impactant l'activité de la marche (Sheffler & Chae, 2015). Une majorité de patients post-AVC adoptent une marche de type « hémiparétique » caractérisée notamment par des changements spatio-temporels, cinétiques et cinématiques comparativement aux individus sains (Balaban & Tok, 2014; Sheffler & Chae, 2015). Une plus grande variabilité a également été retrouvée chez ces patients et associée à une augmentation du risque de chute (Antonellis et al., 2018; J. B. Dingwell & Marin, 2006; Stergiou et al., 2006; Stergiou & Decker, 2011). La perte d'indépendance fonctionnelle liée aux capacités de marche est aussi grandement associée à une qualité de vie altérée auprès de cette population (Laurent et al., 2011). Elle doit donc être prise en compte dans la prise en charge thérapeutique. Ainsi, la rééducation à la marche est un objectif majeur de la prise en charge en physiothérapie (Veerbeek et al., 2014).

L'analyse quantifiée de la marche est un examen clinique permettant d'obtenir des informations quantitatives sur la marche du patient pour mieux identifier et comprendre ses déficits (Armand et al., 2015; Carcreff et al., 2016). L'analyse des paramètres spatio-temporels nous donne une idée générale de la marche dans le temps et l'espace (par exemple la vitesse, le temps d'appui et la symétrie gauche-droite) mais ne fournit pas d'informations sur les mouvements angulaires et linéaires des segments du corps comme le fait l'analyse cinématique de la marche (Carcreff et al., 2016). Les mouvements cinématiques et leur variabilité intrinsèque permettent notamment de quantifier les fluctuations du mouvement liées aux atteintes cliniques et d'évaluer l'efficacité des interventions thérapeutiques et de rééducation par la mesure des changements de variabilité quantifiés (Hausdorff, 2005). L'étude de la variabilité des paramètres cinématiques apporte à celle des paramètres spatio-temporels une approche complémentaire de l'analyse de la marche puisqu'elle permet une mesure de toutes les articulations dans tous les plans du MI.

Or, à notre connaissance, l'analyse de la variabilité intrinsèque des angles des articulations des membres inférieurs durant la marche chez les patients au stade chronique d'un AVC reste peu explorée. De plus, aucune étude ne s'est concentrée sur les relations entre la variabilité intrinsèque cinématique et les évaluations cliniques fonctionnelles (distance de marche, degré de l'atteinte) et analytiques (scores cliniques de motricité, spasticité, sensibilité).

Caractériser la variabilité cinématique de la marche et ses liens avec les évaluations cliniques fournirait une compréhension plus complète des troubles de la marche des patients au stade chronique d'un AVC. Dans certains cas, la variabilité cinématique de la marche pourrait permettre une évaluation plus fine pour évaluer l'altération du contrôle moteur (pour le MI parétique) avec des stratégies de compensation (pour le MI non parétique) et prédire le risque de chute (Fotiadou et al., 2018; Milovanović & Popović, 2012). De plus, l'évaluation de la variabilité cinématique de la marche pourrait permettre une meilleure définition des objectifs de traitement et de leur évaluation et apporter ainsi des éléments cliniques pertinents afin de prodiguer une prise en charge individualisée aux patients post-AVC (Armand et al., 2015; Carcreff et al., 2016).

2.2. Objectifs de l'étude

Cette étude vise à mieux comprendre la variabilité intrinsèque cinématique de la marche chez les patients au stade chronique d'un AVC.

Elle a pour objectif primaire (1) d'examiner la variabilité cinématique des membres inférieurs des patients post-AVC en comparaison des participants contrôles et (2) d'examiner et comparer la variabilité cinématique du membre inférieur parétique à celle du membre inférieur non parétique chez les patients post-AVC.

L'objectif supplémentaire de cette étude est (3) d'examiner s'il existe une association entre la variabilité cinématique et les scores cliniques chez les patients post-AVC.

2.3. Questions de recherche et hypothèses

Les questions auxquelles ce travail va tâcher de répondre sont les suivantes.

En lien avec l'objectif primaire :

1) La variabilité cinématique des membres inférieurs est-elle différente entre les patients post-AVC et les participants contrôles ? Ce travail se base sur l'hypothèse que les patients post-AVC démontrent une variabilité cinématique élevée lors de la marche comparativement aux participants contrôles.

2) Chez les patients post-AVC, la variabilité cinématique est-elle différente entre le membre inférieur parétique et le membre inférieur non parétique ? Ce travail se base sur l'hypothèse que les patients post-AVC démontrent une variabilité cinématique élevée du membre inférieur non parétique comparativement au membre inférieur parétique lors de la marche.

En lien avec l'objectif supplémentaire :

3) Chez les patients post-AVC, la variabilité cinématique est-elle associée aux évaluations

cliniques ? Ce travail fait l'hypothèse que les patients post-AVC qui ont une variabilité cinématique élevée sont plus atteints (basé sur les scores cliniques fonctionnels et analytiques) comparativement aux patients avec une moins grande variabilité cinématique.

3. Méthodologie

3.1. Type d'étude

Ce travail analyse a posteriori des données recueillies dans le cadre du projet de recherche *HEmiparesis Inter-limb coordination and Dual task Interference* (HEIDI).

HEIDI est une étude observationnelle transversale, monocentrique évaluant la coordination intra-membre en condition d'interférence cognitivo-motrice et sensori-motrice au cours de la locomotion chez des patients post-AVC en phase chronique comparativement à des participants sains appariés. Elle a été réalisée aux Hôpitaux Universitaires de Genève (HUG) en collaboration avec le service de neurorééducation et le laboratoire de cinésiologie Willy Taillard (LCWT). Les données ont été récoltées en 2016 par le doctorant Sébastien Baillieux ainsi que par l'équipe du Docteur Stéphane Armand au LCWT. L'utilisation des données pour la recherche a été approuvée par le comité Ethique Cantonal de Genève (GE 15-227) et le consentement éclairé et signé des participants recueilli préalablement à toute évaluation.

3.2. Population

3.2.1. *Sélection des participants*

Dans l'étude HEIDI, 12 participants au stade chronique d'un premier AVC supratentorielle unilatérale (groupe AVC) et 10 participants sans antécédent médical ou chirurgical notable, appariés sur l'âge et les caractéristiques anthropométriques (groupe contrôle) ont été inclus.

Les participants du groupe AVC ont été recrutés lors de la consultation de neurorééducation des HUG et les participants du groupe contrôle dans l'entourage du patient ou au sein du personnel de l'hôpital.

3.2.2. *Critères d'éligibilité*

Pour l'inclusion à l'étude HEIDI, les participants devaient répondre aux critères d'inclusion suivants.

Groupe AVC :

- Participants majeurs (≥ 18 ans) ayant perdu la capacité de marcher secondairement à une hémiparésie s'intégrant dans le cadre d'un syndrome du motoneurone supérieur, dans les suites d'une affection neurologique cérébrale et ayant récupéré cette capacité ;
- Participants présentant une atteinte fonctionnelle stable ;
- Participants capables de marcher sans aide externe (humaine ou matérielle) sur une distance de 10 mètres ;
- Participants suivis en ambulatoire dans le service de neurorééducation des HUG.

Groupe contrôle :

- Participants majeurs (≥ 18 ans) appariés sur le sexe, l'âge, le poids et la taille ;
- Participants capables de marcher sans aide externe (humaine ou matérielle) sur une distance de 10 mètres.

Les critères d'exclusion étaient les suivants.

Groupe AVC :

- Participants présentant une altération marquée des fonctions cognitives (score au *Mini-Mental State Examination* (MMSE) ≤ 24) ;
- Participants présentant une affection pouvant interférer avec la marche et son contrôle (syndrome cérébelleux, atteinte ostéoarticulaire au membre inférieur, antécédent d'AVC) ;
- Participants ayant bénéficié d'un traitement de la spasticité dans les six mois précédant l'inclusion dans le protocole ou d'une chirurgie des membres inférieurs dans l'année précédant l'inclusion dans le protocole.

Groupe contrôle :

- Participants présentant une altération marquée des fonctions cognitives (score au MMSE ≤ 24) ;
- Participants présentant une affection pouvant interférer avec la marche et son contrôle (pathologie neurologique préexistante, atteinte ostéoarticulaire au membre inférieur, troubles de la sensibilité au membre inférieur) ;
- Participants ayant bénéficié d'une chirurgie des membres inférieurs dans l'année précédant l'inclusion dans le protocole.

3.3. Procédures

Les participants inclus ont été invités à participer à trois visites. Celles-ci ont été réalisées par le même évaluateur. La durée totale de participation (visite 1, 2 et 3) était estimée à approximativement 3 heures et 30 minutes.

3.3.1. Visite 1 : information orale et écrite

La visite 1 s'intégrait dans le cadre du suivi clinique des patients présentant une hémiparésie au sein du service de neurorééducation des HUG. Cette consultation durait 30 minutes et permettait de remettre aux patients une information orale et écrite. Pour les participants du groupe contrôle, une visite de pré-inclusion permettant la remise d'une information orale et écrite sur le protocole de recherche a également été réalisée au sein du service de neurorééducation des HUG.

3.3.2. Visite 2 : consentement, anamnèse et examen clinique

La visite 2 avait lieu 48 heures après la visite 1 dans le service de neurorééducation des HUG. Le but de cette visite était de recueillir le consentement éclairé et signé des participants ainsi que de réaliser une évaluation de leur état de santé.

Pour les participants présentant un AVC, la session durait une heure. Elle consistait à recueillir l'anamnèse et l'examen clinique du patient. L'évaluation comprenait les bilans cardiovasculaire, respiratoire, neurologique (force musculaire, spasticité, sensibilité), ostéoarticulaire (amplitudes articulaires) et neuropsychologique (MMSE, héminégligence).

Pour les participants du groupe contrôle, la session durait 30 minutes. Elle consistait à vérifier les éléments anamnestiques et cliniques d'inclusion et de non-inclusion. L'évaluation comprenait également les bilans cardiorespiratoire, neurologique, ostéoarticulaire et neuropsychologique.

3.3.3. Visite 3 : évaluation cinématique de la marche

La visite 3 était réalisée un jour après la visite 2 et durait au maximum deux heures au LCWT. Elle consistait à évaluer la cinématique de la marche des participants. Cette session a été réalisée dans les deux groupes selon un protocole identique.

Pour commencer, la salle a été préparée et les systèmes de mesure (16 caméras Oqus dont 12 caméras Oqus 7+ et 4 caméras Oqus 210c, Qualysis, Suède) calibrés. Le patient a ensuite été équipé de marqueurs réfléchissants passifs disposés sur la peau selon le modèle Plug-In-Gait (Figure 4) (Davis et al., 1991).

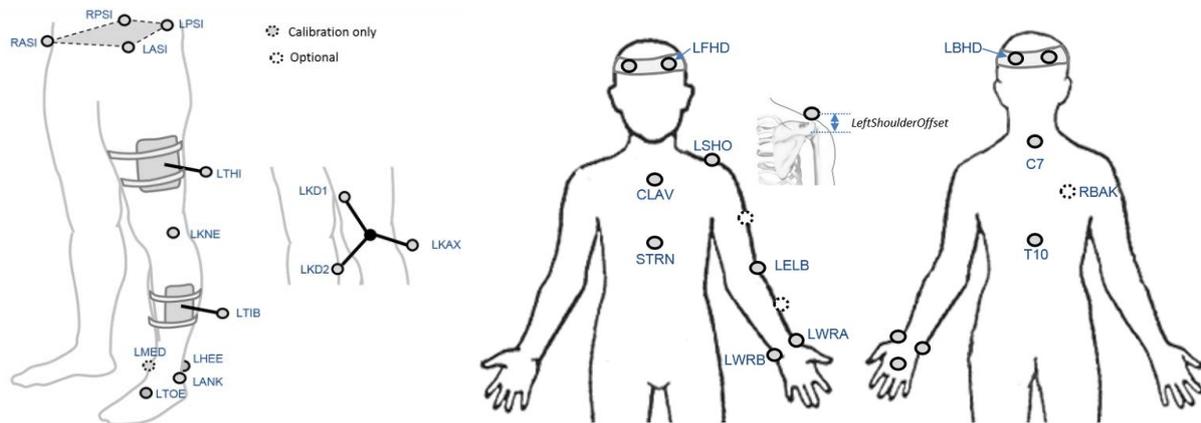


Figure 4 : Placement des marqueurs réfléchissants passifs selon le modèle Plug-in-Gait. Les abréviations utilisées pour le positionnement des marqueurs peuvent être retrouvées dans la référence suivante. Tiré de : Leboeuf et al., 2019.

Par la suite, il était demandé aux participants de marcher à vitesse naturelle, pieds nus et sur une distance de 10 mètres (10MWT). Puis, afin d'évaluer une tâche fatigante locomotrice, un test de marche de 6 minutes (6MWT) a été réalisé. Les participants devaient parcourir la plus longue distance possible pendant six minutes en effectuant des allers retours de 20 mètres au sein du couloir de marche du LCWT. Le niveau de perception de l'effort était évalué par l'échelle de Borg à 2, 4 et 6 minutes. Le niveau de fatigue des participants était évalué avant et après l'évaluation par une échelle visuelle analogique (EVA).

3.4. Recueil des données

Les trois visites ont permis de récolter trois types de données : les données de l'anamnèse, les données de l'examen clinique et les données de l'AQM. Elles ont toutes été recueillies pour le groupe AVC et le groupe contrôle et ont été anonymisées.

3.4.1. Données de l'anamnèse

Les données de l'anamnèse ont été recueillies lors de la visite 2. Elles comprennent le sexe, l'âge et le nombre de chutes durant l'année précédente pour tous les participants et le diagnostic, le côté atteint et le délai post-AVC pour les patients post-AVC. Elles ont été recueillies sur des *Case Report Forms* papier et ont été retranscrites sur ordinateur dans un second temps.

3.4.2. Données de l'examen clinique

Les données de l'examen clinique ont été recueillies durant la visite 2 ainsi que lors de la visite 3 pour les données cliniques sur la marche. Elles ont également été écrites sur des *Case Report Forms* papier puis retranscrites ultérieurement sur ordinateur.

Les données récoltées durant l'examen clinique comprennent :

- Les **paramètres anthropométriques** : la taille (m) et le poids (kg) ont été recueillis pour tous les participants et l'indice de masse corporelle (IMC, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$) calculé. Les paramètres anthropométriques de longueur des membres inférieurs (m), la largeur des chevilles (m) et des genoux (m) ainsi que la largeur du bassin (m) étaient mesurés au mètre ruban ou au pied à coulisse pour permettre le calcul des paramètres cinématiques de marche.
- Les **amplitudes de mouvement** (*range of motion* (ROM)) : elles ont été mesurées passivement par goniométrie pour les hanches (flexion/extension/abduction/adduction), genoux (flexion/extension) et chevilles (flexion plantaire/flexion dorsale).
- La **force musculaire** : elle a été évaluée sur 8 groupes musculaires (flexion/extension/abduction/adduction de hanche, flexion/extension de genou, flexion plantaire/flexion dorsale de cheville) selon l'échelle *Medical Research Council* (MRC) à 6 niveaux (0 : absence de contraction décelable à 5 : force normale comparable au côté sain).
- La **spasticité** : elle a été évaluée sur les mêmes groupes musculaires selon l'échelle modifiée d'Ashworth (MAS) à 6 niveaux (0 : pas d'augmentation du tonus musculaire à 4 : hypertonie majeure, mouvement passif impossible).
- La **sensibilité** : elle a été évaluée à l'aide du test du mono-filament de Semmes-Weinstein sur la face plantaire de l'hallux. Vingt mono-filaments calibrés en nylon étaient utilisés (taille du mono-filament s'étendant de 1,65 (0,008 grammes, sensation normale) à 6,65 (300 grammes, anesthésie)).
- Les **fonctions cognitives** : elles ont été évaluées à l'aide du MMSE. Un score ≤ 24 indiquait une altération marquée des fonctions cognitives et était un motif d'exclusion de l'étude.
- La **fonction de la marche** : elle a été évaluée selon la *new Functional Ambulation Classification* (nFAC) à 9 niveaux (0 : marche impossible à 8 : marche autonome et franchissement d'obstacles possibles).
- La **vitesse de marche** : elle a été évaluée à l'aide du 10MWT en mètres par seconde (m/s) sur une courte durée.
- L'**endurance à la marche** : la distance maximale réalisée a été évaluée à l'aide du 6MWT en effectuant des allers retours de 20 mètres. L'échelle de Borg a évalué la perception de l'effort à 2, 4 et 6 minutes (6 : aucun effort à 20 : effort exténuant). L'EVA a permis de quantifier le niveau de fatigue induit par la passation du test (0 : absence de fatigue à 10 : fatigue maximale). Le test était réalisé sans aide technique et sans aide humaine. Des chaises étaient mises à disposition des participants pour leur

permettre une pause si nécessaire. Des encouragements ont eu lieu durant la dernière minute du test.

3.4.3. Données de l'AQM

Les données de l'AQM ont été récoltées durant la visite 3. Les trajectoires des marqueurs ont été enregistrées à une fréquence de 100 Hz. Le calcul des paramètres cinématiques de marche a été réalisé à l'aide du logiciel Visual 3D (C-Motion INC, USA).

Les données de l'AQM comprennent :

- Des **données descriptives** : la longueur et largeur des membres inférieurs, le nombre de cycles.
- Des **données spatio-temporelles** : la vitesse de marche, la cadence, la longueur du pas et le temps d'appui du côté droit et du côté gauche.
- Des **données cinématiques** : les angles des articulations de la hanche, du genou et de la cheville dans les plans frontal, sagittal et transverse mesurés pour les deux côtés.

3.5. Calcul de la variabilité intrinsèque cinématique

Dans ce travail, la GaitSD a été choisie afin de considérer la variabilité avec un score global pour chaque participant (GaitSD globale) et pour chaque membre inférieur (GaitSD MI).

3.5.1. Gait Standard Deviation

Le score de la GaitSD a été calculé de la manière suivante :

$$\text{GaitSD} = \sqrt{\frac{1}{V} \sum_{k=1}^V \text{GVSD}_k^2} \quad (\text{Sangeux et al., 2016}).$$

La GaitSD globale était composée de 15 variables cinématiques (trois variables du bassin (antéversion, abduction, rotation) et six variables par MI (flexion/abduction/rotation de hanche, flexion de genou, dorsiflexion de cheville et angle de progression du pied)) et la GaitSD d'un MI était composée de neuf variables cinématiques (trois variables du bassin et six variables du MI).

Deux scores de GaitSD ont été exportés. Le premier score a été réalisé en recueillant de manière aléatoire six cycles de marche du 10MWT à vitesse spontanée correspondant au nombre de cycles minimum réalisé par les participants du groupe contrôle. Les six cycles correspondent également au nombre minimum de foulées préconisé par Sangeux et ses collaborateurs (Sangeux et al., 2016). Le deuxième score a été réalisé en recueillant de manière aléatoire huit cycles de marche correspondant au nombre de cycles minimum réalisé par les participants du groupe AVC afin d'obtenir davantage de précision pour ce groupe.

3.6. Évaluation des scores cliniques

3.6.1. *Scores analytiques composites*

Afin de quantifier l'ampleur des déficiences cliniques du MI observées dans le plan sagittal, des scores analytiques composites ont été élaborés dans ce travail. Ceux-ci ont été établis pour la spasticité et la force musculaire selon la méthode proposée par Papageorgiou et al. (2019). Des scores de ROM et de sensibilité ont également été réalisés. Ils suivent le même principe, celui de définir les potentielles déficiences (Papageorgiou et al., 2019).

Les mesures de spasticité, force musculaire et ROM, recueillies de l'examen clinique, ont été regroupées en scores de déficiences spécifiques aux articulations (scores articulaires pour la hanche, le genou et la cheville) et ont ensuite été créées sous forme de scores composites totaux (scores composites pour l'ensemble du MI) (Annexe 2).

Dans le cas de muscles synergiques (par ex. les muscles gastrocnémiens et soléaire), un score médian a été calculé pour représenter le score articulaire. En outre, lorsque les agonistes et les antagonistes d'une articulation étaient connus pour être impliqués dans la déficience post-AVC, la somme a été calculée pour représenter le score articulaire.

Pour la **spasticité**, l'échelle de MAS a été utilisée selon 6 niveaux (scores possibles : 0, 1, 1.5, 2, 3, 4). Les scores de spasticité ont été regroupés en fonction de l'articulation, ce qui donne la spasticité de la hanche (MAS fléchisseurs de hanche 0-4), du genou (MAS fléchisseurs et extenseurs du genou 0-8) et de la cheville (score médian du MAS des muscles gastrocnémiens et soléaire 0-4). Un score composite de spasticité a été défini comme la somme de tous les groupes musculaires évalués pour la spasticité (score de la hanche, du genou et de la cheville, 0-16).

Pour la **force musculaire**, l'échelle MRC a été utilisée selon 6 niveaux (scores possibles de 0 à 5). Les scores de force musculaire ont été regroupés pour la hanche (force des fléchisseurs et extenseurs de hanche 0-10), pour le genou (force des fléchisseurs et extenseurs de genou 0-10) et pour la cheville (force des fléchisseurs plantaires et dorsaux 0-10). Le score composite de force musculaire a été défini comme la somme des scores articulaires (0-30).

Pour le **ROM**, les valeurs obtenues passivement par goniomètre ont été comparées aux individus sains de l'étude et ont été calculées selon une échelle ordinaire à 3 points (0 : valeurs supérieures au 75^e percentile représentant des contractures légères ; 1 : valeurs entre les 25^e et 75^e percentile représentant des contractures modérées ; 2 : valeurs inférieures au 25^e percentile représentant des contractures sévères). Les scores de ROM ont été regroupés pour la hanche (0-2), pour le genou (0-2) et pour la cheville (0-2). Le score composite de ROM a été défini comme la somme des scores articulaires (0-6).

Pour la **sensibilité**, aucun score articulaire ou composite n'a pu être réalisé car le test du mono-filament de Semmes-Weinstein a été réalisé sur un unique point (la face plantaire de l'hallux). Le score de sensibilité a toutefois été défini selon 3 niveaux du test du mono-filament (0-2) : 0 : valeurs de 0.008 à 0.07 grammes représentant une sensation normale ; 1 : valeurs de 0.16 à 180 grammes représentant une hypoesthésie ; 2 : 300 grammes représentant une anesthésie (Fabrication Entreprises Inc, 2017; Suda et al., 2021).

3.6.2. Scores fonctionnels de la marche

Afin de se rendre compte de la sévérité de l'atteinte de la marche des participants de l'étude, nous avons recueilli différents scores fonctionnels : le 10MWT, le 6MWT, le nFAC et l'indice de déviation de la marche (GDI).

Le **10MWT** a été utilisé afin de déterminer la vitesse de marche. Il permet de prédire la capacité de marche et représente une méthode fiable de classification des patients. Une vitesse inférieure à 0.4 m/s indique une marche possible à domicile, une vitesse entre 0.4 et 0.8 m/s une marche limitée en communauté et une vitesse au-delà de 0.8 m/s une marche communautaire (Shirley Ryan AbilityLab, 2022a).

Le **6MWT** a été utilisé afin de quantifier la distance parcourue sur 6 minutes et a permis d'évaluer la capacité aérobie lors de la marche (Shirley Ryan AbilityLab, 2021).

Le **nFAC** a été utilisé pour caractériser le niveau de fonction de la marche des participants de l'étude. Un score bas signifiait que la marche était impossible sans aide. Un score haut indiquait une certaine autonomie à la marche. Ce score nous a donc fourni des informations sur l'indépendance fonctionnelle de la personne lors de la marche (Brun et al., 2000).

Le **GDI** a été réalisé pour chaque MI selon la formule de Schwartz & Rozumalski (2008). Puis, afin d'obtenir un score global par participant, la moyenne des deux côtés a été calculée comme dans l'article de Guzik & Druzbicki (2020). Ce score a ainsi permis de quantifier la qualité du schéma de marche en fournissant un score de déviation par rapport à des données normatives de référence. Il fournit une valeur quantitative de 0 à 100. Un score de 100 indique une marche normale et un score décroissant (inférieur à 100) correspond à une plus grande anomalie de la marche (Schwartz & Rozumalski, 2008).

3.7. Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le programme Stata, version 16.1.

Pour décrire les données démographiques et cliniques, des statistiques descriptives ont été réalisées sous forme de médiane (premier quartile – troisième quartile) pour les variables continues et de valeur absolue (n) pour les variables dichotomiques. Pour vérifier

l'homogénéité des groupes, le test de Fisher a ensuite été effectué pour les données catégorielles et le test de la somme des rangs de Wilcoxon-Mann-Whitney pour les données quantitatives.

Pour répondre à l'objectif 1 de ce travail, une comparaison de la GaitSD globale du groupe AVC et du groupe contrôle a été conduite. Les échantillons étant de petites tailles et indépendants, le test non-paramétrique de Wilcoxon-Mann-Whitney a été utilisé.

Pour répondre à l'objectif 2, une comparaison de la GaitSD du MI parétique et du MI non parétique des patients post-AVC a été réalisée. Les échantillons étant de petites tailles et appariés, le test des rangs signés de Wilcoxon a été réalisé.

Pour répondre à l'objectif 3, des corrélations non-paramétriques (coefficients de Spearman ou Kendall selon la présence d'ex-aequo) ont été réalisées entre la GaitSD globale et les scores cliniques fonctionnels ainsi qu'entre la GaitSD du MI parétique et les scores analytiques.

Pour toutes les analyses, le seuil de significativité a été admis lorsque la valeur p était inférieure à 0.05.

4. Résultats

Les caractéristiques démographiques des participants de l'étude sont décrites dans le tableau 1. Les deux groupes ne sont pas statistiquement différents au niveau du sexe, de l'âge, des paramètres anthropométriques, du nombre de chutes et du statut cognitif.

Tableau 1 : Caractéristiques démographiques, anthropométriques, ainsi que l'incidence des chutes, le statut cognitif des participants de l'étude et les caractéristiques de la lésion des participants post-AVC.

	Groupe AVC (n=12)	Groupe contrôle (n=10)	Valeur p
Sexe (hommes/femmes)	6/6	4/6	0.69
Age (ans)	58 (50-64)	59 (57-61)	0.88
Taille (cm)	166 (163-181)	169 (156-175)	0.59
Poids (kg)	86 (62-98)	72 (62-79)	0.26
Indice de masse corporelle (kg.m ⁻²)	26 (24-30)	25 (23-26)	0.22
Chute année précédente (non-chuteur/chuteur)	8/4	10/0	0.09
Mini-Mental State Examination (0-30)	29 (27-29)	29 (29-29)	0.17
Délai depuis l'AVC (mois)	17 (9-33)		
Côté de la lésion (droite/gauche)	8/4		
Type de la lésion (ischémique/hémorragique)	8/4		

Données présentées sous forme de valeur absolue ou de médiane (Q1-Q3). Test de Fisher réalisé pour les données qualitatives (sexe, chute) et test de Wilcoxon-Mann-Whitney pour les données quantitatives (âge, taille, poids, indice de masse corporelle, Mini-Mental State Examination).

Dans le groupe AVC, les participants étaient inclus plus d'un an après leur AVC et présentaient majoritairement des lésions à droite et de type ischémique. Les caractéristiques individuelles des participants du groupe AVC sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Caractéristiques individuelles démographiques, anthropométriques, ainsi que l'incidence des chutes, le statut cognitif et les caractéristiques de la lésion des participants du groupe AVC.

Parti- cipant (ID)	Sexe (H/F)	Age (ans)	Taille (cm)	Poids (kg)	IMC (kg·m ⁻²)	Chute année précé- dente (n)	MMSE (0-30)	Délai depuis l'AVC (mois)	Côté de la lésion (D/G)	Type de lésion (I/He)
1	F	49	163	61	23	0	29	15	D	I
2	F	67	154	59	25	0	29	72	G	I
3	F	53	153	100	43	0	30	26	G	He
4	F	52	164	70	26	1	24	14	D	I
5	H	65	179	88	28	1	27	7	D	I
6	H	42	183	102	31	0	30	19	D	He
7	H	63	163	98	37	1	27	15	D	I
8	F	63	167	59	21	0	29	8	G	He
9	H	64	187	92	26	0	28	9	D	He
10	H	53	180	98	30	1	29	31	G	I
11	H	67	181	83	25	0	26	56	D	I
12	F	31	164	63	23	0	29	35	D	I

Données présentées sous forme de valeur absolue. Abréviations utilisées : ID=identifiant, H=hommes, F=femmes, IMC=indice de masse corporelle, MMSE=Mini-Mental State Examination, D=droite, G=gauche, I=ischémique, He=hémorragique.

Les scores cliniques des participants de l'étude sont décrits dans le tableau 3. Les deux groupes ne sont pas statistiquement différents au niveau du ROM. En revanche, ils sont statistiquement différents au niveau des scores du nFAC, du 6MWT, du 10MWT, du GDI, des scores composites de force et de spasticité ainsi que du score de la sensibilité à la pression par le test au monofilament.

Tableau 3 : Scores cliniques des participants de l'étude.

	Groupe AVC (n=12)	Groupe contrôle (n=10)	Valeur p
nFAC (0-8)	6 (6-6)	8 (8-8)	< 0.01*
6MWT (m)	290 (255-380)	481 (458-570)	< 0.01*
10MWT (m/s)	0.80 (0.50-1.04)	1.34 (1.23-1.41)	< 0.01*
GDI (0-100)	55 (31-63)	70 (66-85)	< 0.01*
Score composite force (0-30)	24 (20-25.5)	30 (30-30)	< 0.01*
Score composite spasticité (0-16)	6.75 (5-8)	0 (0-0)	< 0.01*
Score composite ROM (0-6)	1 (0.5-2)	0.5 (0-1)	0.17
Score du monofilament (1.65-6.65)	4.08 (3.73-4.13)	1.65 (1.65-1.65)	< 0.01*

Données présentées sous forme de médiane (Q1-Q3). Test de Wilcoxon-Mann-Whitney réalisé pour les données quantitatives. Abréviations utilisées : nFAC=New Functional Ambulation Classification, 6MWT=test de 6 minutes, 10MWT=test de 10 mètres, GDI=Indice de déviation de la marche, ROM=amplitude de mouvement.

Le groupe AVC présente des scores inférieurs en lien avec les déficiences liées à leur pathologie. La diminution du nFAC du groupe AVC indique que la personne peut marcher seule sur surface plane mais que le passage des escaliers n'est pas encore réalisable normalement (escaliers possibles sans aide et/ou surveillance de la part d'une tierce personne en utilisant une rampe ou une canne) (Brun et al., 2000). La distance parcourue durant le 6MWT par le groupe AVC est de pratiquement 200 mètres de moins que celui du groupe contrôle. Il est également inférieur aux normes établies pour les individus post-AVC au stade chronique (408 à 422 mètres) (Shirley Ryan AbilityLab, 2021). Le 10MWT du groupe AVC est inférieur de 0.5 m/s par rapport au groupe contrôle mais se rapproche des normes établies pour la population AVC (0.84 ± 0.3 m/s) (Shirley Ryan AbilityLab, 2022a). Le GDI est largement inférieur à 100 et exprime alors un schéma de marche éloigné de la norme (Schwartz & Rozumalski, 2008). Le score composite de force indique la présence d'une légère déficience motrice et le score de spasticité relève une déficience modérée du tonus musculaire (Medical Research Council, 1977; Shirley Ryan AbilityLab, 2022b). Finalement, le score du test de la sensibilité à la pression au monofilament exprime la présence d'une hypoesthésie chez tous les participants du groupe AVC (Suda et al., 2021). Les évaluations cliniques pour chaque participant du groupe AVC sont détaillées dans le tableau 4.

Tableau 4 : Scores cliniques des participants du groupe AVC.

Participant (ID)	nFAC (0-8)	6MWT (m)	10MWT (m/s)	GDI (0-100)	SC force (0-30)	SC spasticité (0-16)	SC ROM (0-6)	Monofilament (1.65-6.65)
1	6	255	0.87	71.41	27	0	1	4.31
2	6	290	0.84	62.01	24	8	1	3.22
3	6	202	0.45	23.78	19	8	3	3.61
4	6	260	0.54	28.62	24	7	1	3.61
5	6	NR	0.25	31.52	23	6.5	1	3.84
6	6	295	0.70	52.29	18	6.5	3	3.84
7	6	125	0.42	30.03	12	8	2	4.08
8	6	460	1.26	64.31	24	7	0	4.08
9	6	330	0.92	53.34	25	4	0	4.17
10	6	382	1.13	56.20	27	6	0	4.08
11	6	267	0.80	60.97	21	8	1	4.56
12	7	380	1.36	89.31	26	0	2	4.08

Données présentées sous forme de valeur absolue. Abréviations utilisées : ID=identifiant, nFAC=New Functional Ambulation Classification, 6MWT=test de 6 minutes, 10MWT=test de 10 mètres, GDI=Indice de déviation de la marche, SC=score composite, NR=non réalisable.

La variabilité cinématique de la marche des participants de l'étude est représentée par la GaitSD et décrite dans le tableau 5. La GaitSD globale est différente entre les deux groupes ($p < 0.01^*$). Dans le groupe AVC, la GaitSD du MI parétique est comparable à celle du MI non parétique ($p = 0.09$). Dans le groupe contrôle, la GaitSD du MI gauche est comparable à celle du MI droit ($p = 0.85$).

Tableau 5 : GaitSD des participants de l'étude.

	Groupe AVC (n=12)	Groupe contrôle (n=10)	Valeur p
GaitSD globale (°)	1.44 (1.26-1.74)	1.19 (0.98-1.25)	<0.01 ^{*A}
GaitSD MI parétique (°)	1.90 (1.53-2.20)		0,09 ^B
GaitSD MI non parétique (°)	1.63 (1.47-2.06)		
GaitSD MI gauche (°)		1,36 (1,17-1,52)	0,85 ^B
GaitSD MI droit (°)		1,37 (1,14-1,52)	

Données présentées sous forme de médiane (Q1-Q3).

^A comparaison inter-groupe ; ^B comparaison intra-groupe.

Les mesures de GaitSD pour chaque participant du groupe AVC sont détaillées dans le tableau 6. La participante 12 présente la variabilité la plus faible tant pour le MI parétique que le MI non parétique, ainsi que pour le score global. À l’opposé, le participant 5 est celui qui montre la plus haute variabilité tant pour le MI parétique que le MI non parétique, ainsi que pour le score global.

Tableau 6 : GaitSD des participants du groupe AVC.

Participant (ID)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
GaitSD globale (°)	1,25	1,26	1,77	2,42	2,68	1,72	1,57	1,61	1,26	1,3	1,17	1,09
GaitSD MI parétique (°)	1,51	1,55	2	3	3,11	2,29	2,02	2,11	1,44	1,79	1,62	1,33
GaitSD MI non parétique (°)	1,52	1,42	2,16	2,64	3,36	1,94	1,66	1,96	1,33	1,59	1,56	1,27

Données présentées sous forme de valeur absolue.

4.1. Comparaison de la GaitSD entre le groupe AVC et le groupe contrôle

L’analyse de la variabilité cinématique indique une différence statistiquement significative de GaitSD globale entre les deux groupes (test de la somme des rangs de Wilcoxon-Mann-Whitney, $p < 0.01^*$), ce qui suggère que le groupe AVC présente une variabilité de la marche plus élevée en comparaison du groupe contrôle (Figure 5).

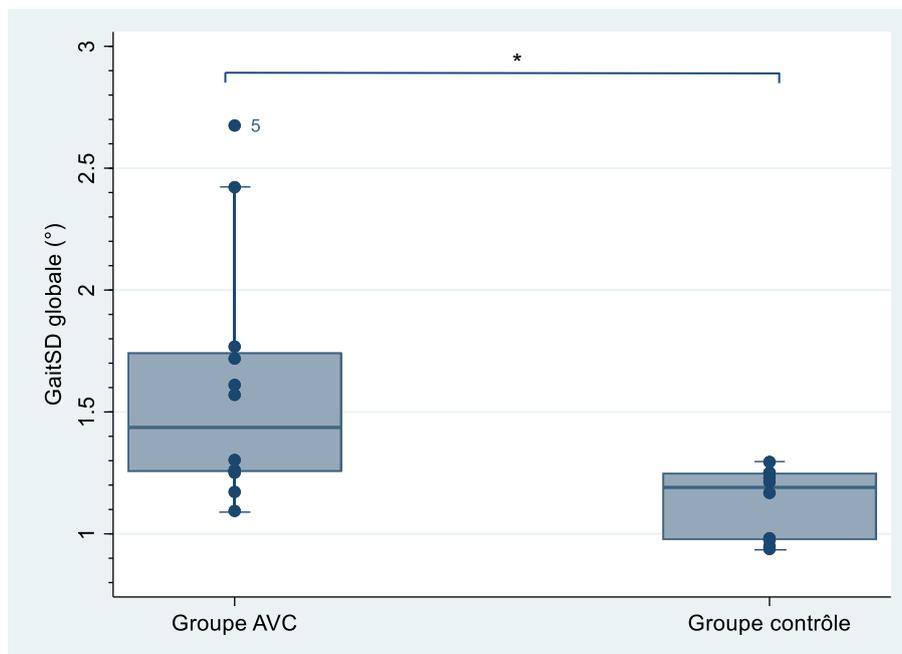


Figure 5 : Représentation graphique de la GaitSD globale du groupe AVC et de la GaitSD globale du groupe contrôle. * Différence significative entre les deux groupes ($p < 0.01$).

Basé sur l'inspection du graphique, la médiane de la GaitSD du groupe AVC est supérieure à celle du groupe contrôle. La dispersion de la GaitSD est aussi augmentée pour le groupe AVC.

Des représentations individuelles des données de la GaitSD ont également été réalisées afin d'estimer s'il existait des valeurs limites correspondant à une démarche pathologique après un AVC. Ces analyses montrent que 7 participants sur 12 du groupe AVC présentent une GaitSD supérieure aux valeurs les plus hautes des participants du groupe contrôle. De même, 4 participants sur 10 du groupe contrôle présentent une GaitSD inférieure aux valeurs les plus basses des participants du groupe AVC. Des valeurs seuils (cut-off scores) sont ressorties pour les participants contrôles et post-AVC de l'étude (Figure 6). Jusqu'à un score de GaitSD de 1.09°, les participants font exclusivement partie du groupe contrôle et à partir d'un score de GaitSD de 1.30°, les participants font exclusivement partie du groupe AVC.

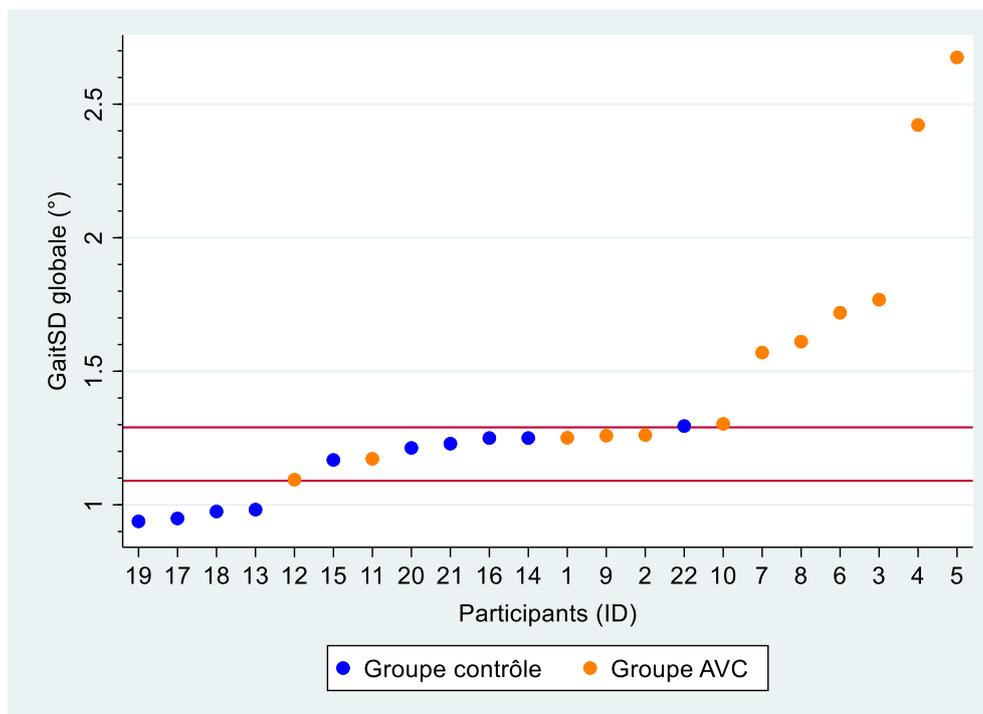


Figure 6 : Représentation de la GaitSD des participants de l'étude et des valeurs seuils. Cut-off inférieur estimé à 1.09° incluant uniquement les participants du groupe contrôle et cut-off supérieur estimé à 1.30° incluant uniquement les participants du groupe AVC.

4.2. Comparaison de la GaitSD entre le membre inférieur parétique et non parétique chez les participants post-AVC

L'analyse de la variabilité cinématique des membres inférieurs des participants du groupe AVC ne montre pas de différence statistiquement significative entre la GaitSD du MI parétique et celle du MI non parétique (test des rangs signés de Wilcoxon, $p=0.09$) (Figure 7).

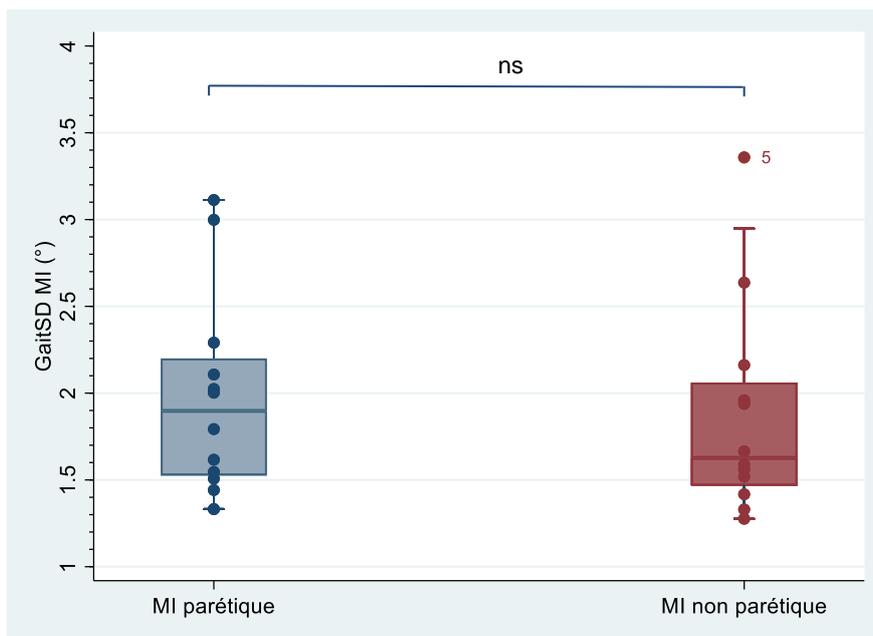


Figure 7 : Représentation graphique de la GaitSD du MI parétique et du MI non parétique pour le groupe AVC. Différence non significative (ns) entre les mesures de GaitSD des deux membres inférieurs ($p=0.09$).

Toutefois, en examinant les résultats pour chacun des participants de l'étude (Figure 8), on remarque que 9 patients post-AVC sur 12 rapportent une variabilité plus grande de leur MI parétique comparativement à leur MI non parétique. A contrario, le MI non parétique semble plus « variable » uniquement pour les participants 1, 3 et 5.

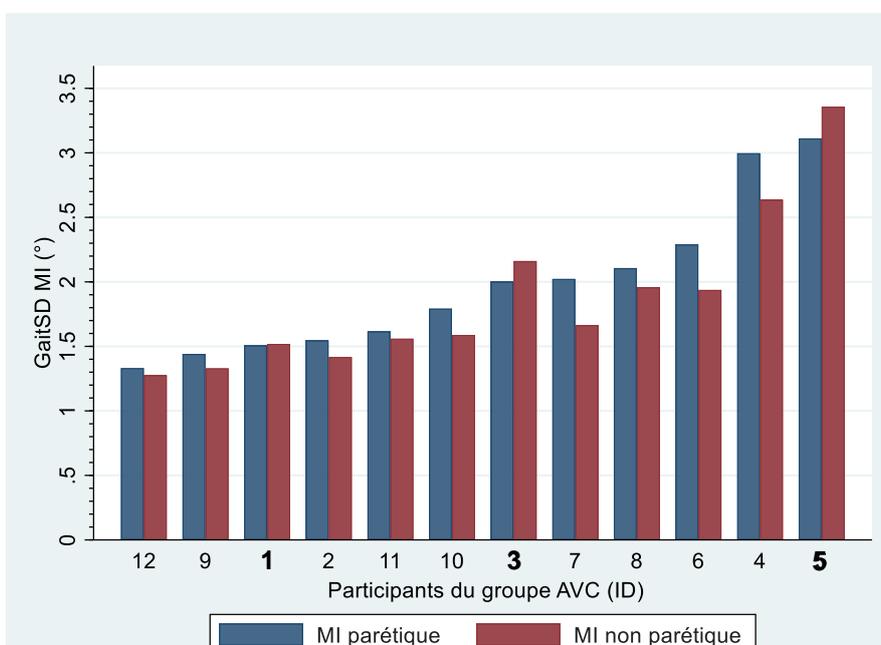


Figure 8 : Représentation individuelle de la mesure de la GaitSD du MI parétique et du MI non parétique chez les participants du groupe AVC. En gras, les participants ayant le côté non parétique plus « variable » que le côté parétique.

4.3. Associations entre la GaitSD et les scores cliniques des participants post-AVC

4.3.1. *Corrélations entre la GaitSD globale et les scores fonctionnels de la marche*

Les analyses de corrélations entre la GaitSD globale et les scores cliniques fonctionnels du groupe AVC suggèrent une association de la GaitSD globale avec la vitesse de marche mesurée pendant le 10MWT et l'indice de déviation de la marche.

L'association entre la GaitSD globale et le 10MWT démontre une corrélation négative moyenne (test de Spearman, $r=-0.66$, $p=0.02^*$) (Figure 9). Elle indique que lorsque la vitesse de marche diminue, la GaitSD augmente et inversement.

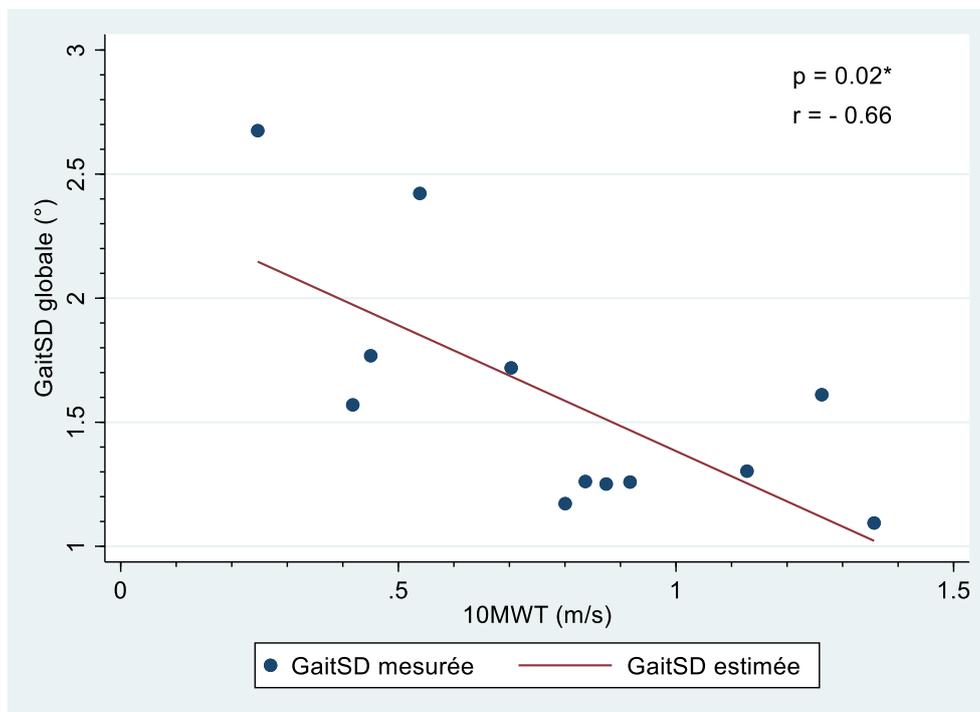


Figure 9 : Graphique de corrélation de la GaitSD avec la vitesse de marche (10MWT). * La corrélation est statistiquement significative.

De même, l'association entre la GaitSD globale et le GDI global démontre une corrélation négative moyenne (test de Spearman, $r=-0.76$, $p<0.01^*$) (Figure 10). Elle indique que lorsque le score du GDI diminue, la GaitSD augmente et inversement.

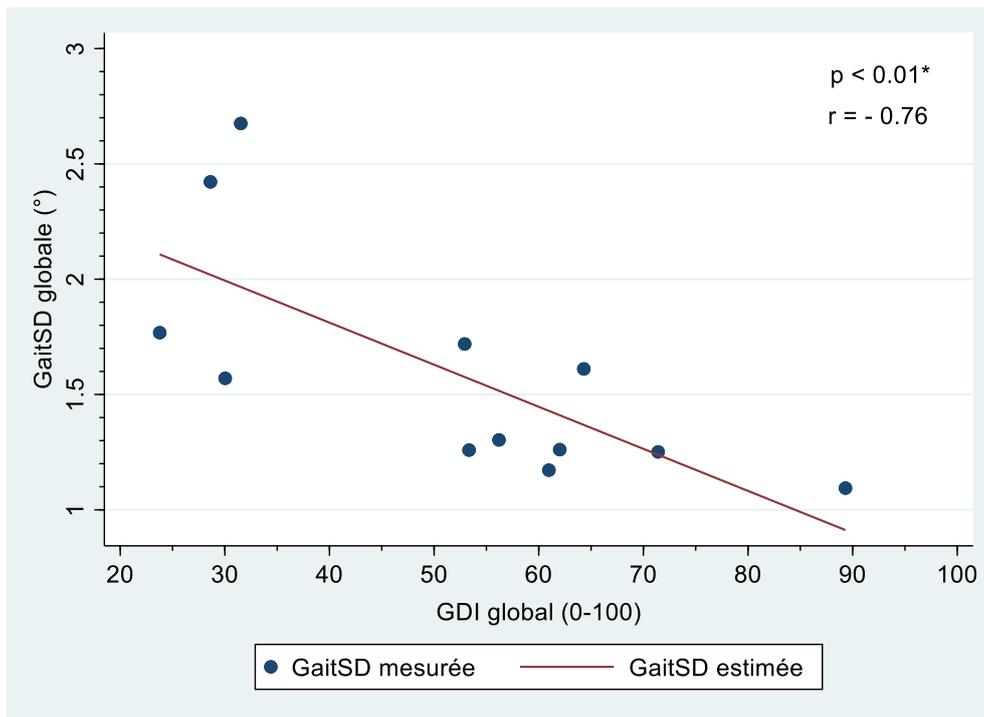


Figure 10 : Graphique de corrélation de la GaitSD avec le GDI. * La corrélation est statistiquement significative.

En revanche, les scores de nFAC et du 6MWT ne présentent pas d'association avec la GaitSD globale (Figure 11).

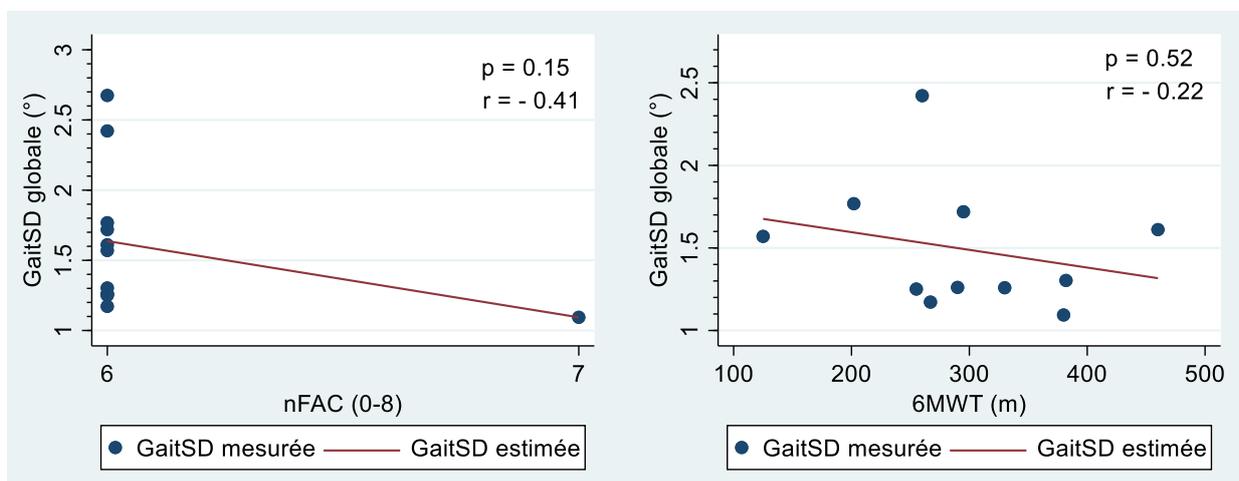


Figure 11 : Graphiques de corrélation de la GaitSD avec le nFAC et le 6MWT. Les corrélations ne sont pas statistiquement significatives.

4.3.2. Corrélations entre la GaitSD du côté parétique et les scores analytiques composites

Les analyses de corrélations entre la GaitSD du côté parétique et les scores cliniques analytiques du groupe AVC ne suggèrent aucune association entre la GaitSD et les scores composites de force, de spasticité, de ROM et le score du test de la sensibilité au monofilament (Figure 12).

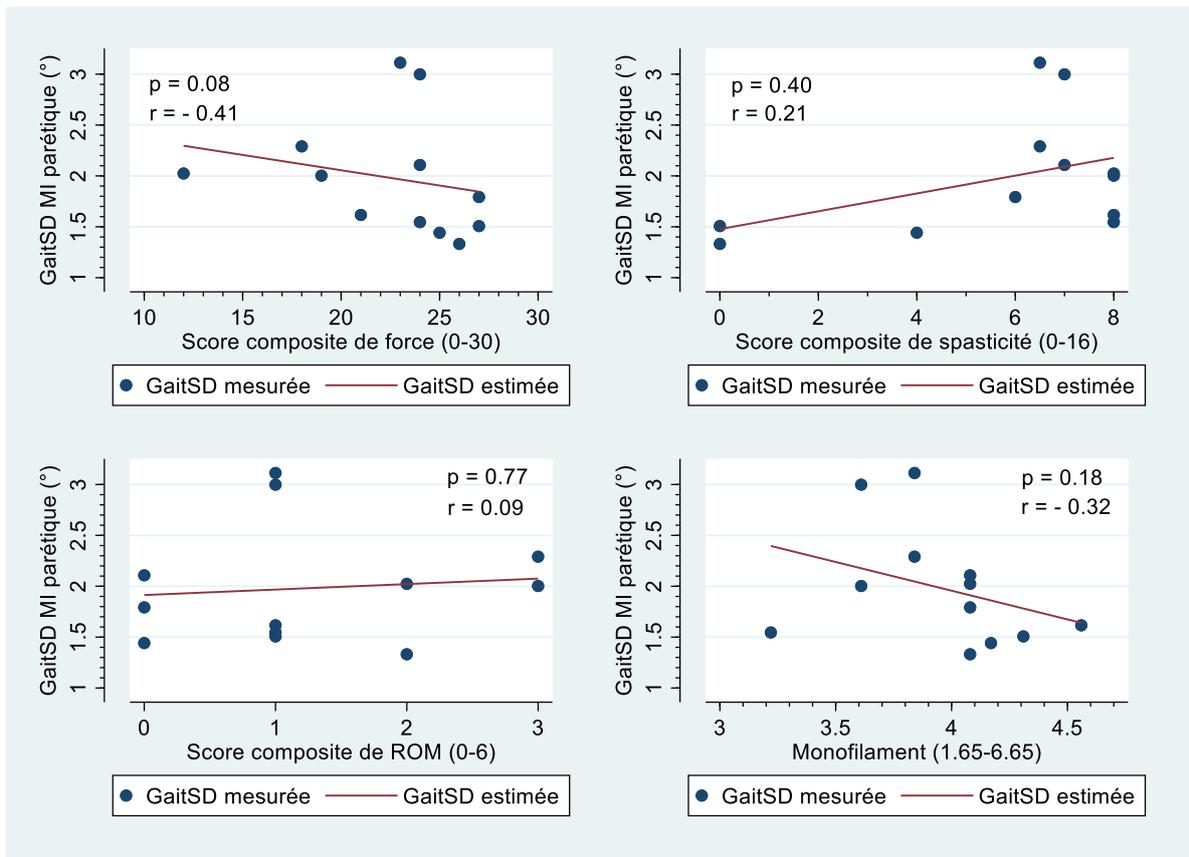


Figure 12 : Graphiques de corrélation de la GaitSD avec les scores cliniques analytiques des participants du groupe AVC. Il n'y a pas d'association statistiquement significative entre la GaitSD et les scores composites de force, de spasticité, de ROM et le score de sensibilité au monofilament.

5. Discussion

L'objectif de cette étude était d'analyser la variabilité cinématique de la marche et ses corrélats cliniques chez des personnes au stade chronique d'un AVC. Les résultats seront synthétisés ci-dessous et discutés selon les objectifs 1 à 3 dans l'ordre chronologique de la réalisation des étapes.

5.1. Variabilité globale des patients post-AVC par rapport à des participants contrôles

Le premier objectif de cette étude était d'évaluer si la variabilité cinématique des patients post-AVC était différente de celle des participants contrôles. Nos résultats confirment notre hypothèse et suggèrent que cette variabilité représentée par la GaitSD globale est différente et plus élevée pour les participants du groupe AVC en comparaison aux participants du groupe contrôle.

Ces résultats sont cohérents avec les recherches comparant la variabilité spatio-temporelle et cinématique des patients post-AVC à des participants contrôles. Par exemple, l'étude de Balasubramanian et al. (2009), évaluant la variabilité spatio-temporelle avec la SD, présente une variabilité augmentée de toutes les caractéristiques spatio-temporelles à l'exception de la largeur de pas chez les participants post-AVC. Guzik et al. (2019) confirment que la variabilité spatio-temporelle exprimée de manière globale à l'aide du score Gait Variability Index (GVI), est augmentée tant pour le MI parétique que le MI non parétique, ainsi que pour la moyenne des deux membres inférieurs comparativement aux participants contrôles. Et finalement, l'étude de Boudarham et al. (2013) montre une augmentation de la variabilité spatio-temporelle, évaluée avec la SD et le CV, et de la variabilité cinématique, évaluée avec l'analyse en composantes principales (PCA). Elle suggère que les patients post-AVC montrent une phase d'adaptation probablement en lien avec un schéma de marche précautionneux. Bien que ces trois études utilisent et analysent des mesures de variabilité différentes, elles ressortent toutes une variabilité de la marche augmentée chez les personnes post-AVC.

En ce qui concerne la GaitSD globale, elle a été évaluée pour des personnes saines et indiquait un score moyen de 1.7° (Sangeux et al., 2016). Or, dans ce travail, le groupe contrôle présente un score moyen de GaitSD à 1.36° . Aucun participant contrôle n'a d'ailleurs obtenu une GaitSD de 1.7° . Cette différence pourrait être expliquée par les caractéristiques de la population et notamment l'âge des participants. Sangeux et al. ont évalué une population de 7 à 16 ans et ont d'ailleurs démontré une corrélation négative de la GaitSD avec l'âge. Ils n'ont toutefois pas pu déterminer quand la variabilité cinématique arrête de diminuer avec l'âge. Ils estiment qu'elle se stabilise à 1.7° dès 16 ans car l'étude de McGinley et al. (2014) prenant en compte des adultes entre 21 et 33 ans relève une GaitSD identique. Notre travail suggère plutôt que la variabilité continue à diminuer avec l'âge pour des personnes âgées entre 57 et 61 ans sans pathologie. Dans ce contexte, il semble essentiel d'obtenir des données supplémentaires sur les personnes saines. Concernant les valeurs de GaitSD des participants post-AVC, cette étude est la première à les relever. Le score médian évalué à 1.44 pour le groupe AVC est également bas comparativement aux individus sains de l'étude de Sangeux

et al. (2016). Cette différence pourrait suggérer que le réapprentissage à la suite d'une pathologie comme l'AVC est probablement moins variable que l'apprentissage durant l'enfance. De futures études évaluant la fiabilité, la validité et les valeurs seuils de la GaitSD dans une population AVC sont nécessaires afin de pouvoir utiliser ce score comme un outil standardisé pour quantifier la variabilité cinématique de la marche.

Ensuite, de nombreux auteurs ont rapporté qu'une variabilité élevée est souvent associée à une augmentation du risque de chute (Antonellis et al., 2018; J. B. Dingwell & Marin, 2006; Stergiou et al., 2006; Stergiou & Decker, 2011). Dans cette étude, 4 participants du groupe AVC ont d'ailleurs chuté durant l'année écoulée et notamment les participants 4 et 5 qui parallèlement présentaient les plus hautes valeurs de GaitSD globale et les participants 7 et 10 qui présentaient des valeurs de GaitSD globale supérieures au cut-off estimé de 1.30°. Les valeurs de GaitSD globale supérieures à 1.30° pourraient donc potentiellement permettre d'identifier les personnes post-AVC à risque de chute.

Cependant la variabilité augmentée n'est pas forcément associée à une marche pathologique. La variabilité retrouvée dans les schémas de marche des patients post-AVC peut représenter la récupération neurologique ou une adaptation positive des déficits neurologiques (Balaban & Tok, 2014; Wonsetler & Bowden, 2017). En effet, après un AVC, les personnes doivent adapter leur marche aux différentes déficiences (Chau et al., 2005; Sheffler & Chae, 2015). Dans un premier temps, la variabilité du mouvement constitue un élément indispensable de réapprentissage moteur d'une tâche telle que la marche et stimule la plasticité cérébrale (Dhawale et al., 2017; Herzfeld & Shadmehr, 2014; Wu et al., 2014). Dans un second temps, la variabilité du mouvement reflète une compensation du système biologique aux différentes atteintes et peut fournir au patient un certain niveau de fonction (Wonsetler & Bowden, 2017). Dans ces cas, la variabilité peut être bénéfique et recherchée par le patient et le thérapeute. Le véritable défi est de pouvoir identifier une « bonne » variabilité de réadaptation du système après un AVC d'une variabilité pathologique liée directement aux déficits (bruits du système).

5.2. Variabilité du membre inférieur parétique versus non parétique des individus post-AVC

Le deuxième objectif de cette étude était d'évaluer si la variabilité cinématique du MI parétique était différente de celle du MI non parétique chez les patients post-AVC. Nos résultats suggèrent que la variabilité cinématique représentée par la GaitSD du MI n'est pas statistiquement différente entre les membres inférieurs. Toutefois, le côté parétique aurait tendance à être plus variable que le côté non parétique en valeur absolue.

Cette tendance a été démontrée par certains auteurs évaluant la variabilité spatio-temporelle avec la SD et le GVI et pourrait être en lien avec des déficits sensori-moteurs post-AVC (Balasubramanian et al., 2009; Guzik et al., 2019). A contrario, Fotiadou et al. (2018) relèvent une variabilité cinématique (évaluée avec le CMC et la RMSD) plus élevée pour le MI non parétique par rapport au MI parétique, suggérant des mécanismes de compensations. Les différences retrouvées pourraient notamment être expliquées par les différentes méthodologies utilisées dans ces études et notamment le choix de la mesure de variabilité. Notre étude est la première à relever les valeurs de GaitSD pour chaque MI. De futures études sont donc nécessaires afin de confirmer ou infirmer nos résultats.

Dans notre étude, l'absence de différence de variabilité entre les membres inférieurs peut être expliquée par le fait qu'après un AVC, un changement de la variabilité peut se manifester sur les deux membres inférieurs, le MI parétique et le MI non parétique. Milovanović & Popović (2012) ont également relevé une modification du schéma de marche sur les deux membres inférieurs, à l'aide du score PCA, chez des personnes au stade chronique d'un AVC. Ils ont distingué deux groupes de patients post-AVC. Le premier groupe était composé de patients présentant des schémas de marche relativement proches des personnes en bonne santé. Le deuxième groupe présentait des schémas modifiés sur les deux membres inférieurs indiquant que des mécanismes compensatoires ont pris place au cours du processus de rééducation. Ces auteurs ont également introduit des valeurs seuils de vitesse de marche à 0.35 m/s permettant de prédire la capacité de marche des participants. Les personnes en dessous de ce seuil présentaient des atteintes plus sévères de la marche (Milovanović & Popović, 2012). Par exemple, dans notre étude, le participant 5 est le seul qui présente une vitesse de marche en dessous de 0.35 m/s et, parallèlement, la plus haute valeur de variabilité du MI parétique et la plus haute valeur de variabilité du MI non parétique. Il pourrait donc appartenir au deuxième groupe décrit par Milovanović & Popović (2012). A contrario, la participante 12 présente la vitesse de marche la plus élevée et une variabilité basse et relativement symétrique entre les membres inférieurs. Son schéma de marche se rapprocherait de celui des participants contrôles comme décrit dans le premier groupe de Milovanović & Popović (2012). Ces différentes observations montrent également que les personnes post-AVC peuvent présenter une symptomatologie très hétérogène.

5.3. Associations entre la variabilité et les scores cliniques

L'objectif supplémentaire de cette étude était d'évaluer si des associations existaient entre la variabilité cinématique des personnes après un AVC et leurs scores cliniques. Nos résultats indiquent une association de la GaitSD globale avec la vitesse de marche mesurée durant le

10MWT et le GDI. La GaitSD globale et celle du MI parétique ne sont pas associées aux autres scores cliniques du groupe AVC.

Premièrement, la corrélation négative de la GaitSD globale avec le 10MWT suggère que plus la vitesse de marche est lente, plus la variabilité sera élevée, et inversement. Comme observé précédemment, le participant 5 est le plus lent de l'échantillon et également le plus variable. À l'opposé, la participante 12 est la plus rapide et la moins variable. La force de cette association est modérée. À notre connaissance, notre étude est la première à reporter une association significative entre la GaitSD et le 10MWT. La corrélation obtenue est tout de même en ligne avec l'étude de Guzik et al. (2019) ayant évalué la variabilité spatio-temporelle globale. Cette dernière conclue en affirmant que les participants ayant une variabilité plus proche des participants contrôles présentaient une vitesse de marche plus rapide (Guzik et al., 2019).

La vitesse de marche est aussi fortement influencée par l'atteinte motrice chez les patients post-AVC. Les personnes lentes présentent souvent une moins bonne stabilité du tronc et une co-contraction accrue entre les muscles gastrocnémiens et le tibia antérieur (Mizuta et al., 2020). Ces déficiences pourraient également venir perturber le mouvement cinématique et augmenter la variabilité des personnes avec une marche plus lente.

Deuxièmement, la corrélation négative entre la GaitSD globale et le GDI global suggère que plus la marche des patients post-AVC varie de la norme des sujets sains, plus la variabilité cinématique sera élevée, et inversement. À notre connaissance, aucune étude n'a fait de lien entre le GDI et la GaitSD chez les patients post-AVC. Cependant, les mêmes variables cinématiques ont été utilisées pour le calcul de ces deux scores (Sangeux et al., 2016). De plus, le GDI a pu être corrélé avec des facteurs explicatifs de la variabilité tels que le 10MWT (Guzik & Druzbicki, 2020). Nous pouvons donc penser qu'une déviation de la marche peut exercer une influence sur la variabilité cinématique et être un potentiel facteur confondant après un AVC.

Par la suite, nos analyses ne démontrent pas de corrélations entre la GaitSD globale et les scores cliniques fonctionnels du nFAC et du 6MWT. Concernant le nFAC, tous les participants du groupe AVC présentaient un score de 6 sur 8, à l'exception de la participante 12 qui présentait un score de 7 sur 8. Il faudrait davantage de catégories au sein de ce test ou un échantillon plus varié pour permettre de véritablement différencier le niveau d'atteinte des sujets et en faire ressortir une possible association. En ce qui concerne le 6MWT, la fatigabilité des patients post-AVC a probablement eu un impact sur leur variabilité cinématique. Des études antérieures ont en effet montré que les patients victimes d'un AVC présentent une grande fatigabilité pendant la marche et que leurs performances motrices diminuent sur des périodes de marche relativement courtes (Sibley et al., 2008, 2009; Straudi et al., 2009).

Straudi et al. (2009) ont également montré que les personnes post-AVC montrent une altération de leurs paramètres cinématiques au cours d'un test de 6 minutes. Le participant 5 n'a d'ailleurs pas été en mesure de réaliser le 6MWT en raison de son importante fatigue et du risque de chute augmenté.

Compte tenu de ce qui précède, les liens entre la variabilité cinématique et les scores cliniques fonctionnels devraient prendre en compte des tests évaluant la mobilité fonctionnelle et le risque de chute tels que le *Time Up and Go* ou le *Mini Balance Evaluation Systems Test*. En effet, ces deux tests, en plus d'être fiables et validés, fournissent des informations sur la capacité de marche, l'équilibre ainsi que le risque de chute (Shirley Ryan AbilityLab, 2022d, 2022c). Ces tests permettent également de réduire l'influence de la fatigabilité.

Finalement, aucune association n'a été démontrée entre la GaitSD du MI parétique et les scores cliniques analytiques de force, spasticité, ROM et sensibilité. Cette étude étant la première à analyser ce type d'association chez les patients post-AVC, aucune comparaison avec la littérature actuelle ne peut être réalisée. En revanche, l'étude de Tabard-Fougère et al. (2022) réalisant des corrélations identiques entre la GaitSD et les scores cliniques chez des participants atteints de paralysie cérébrale, a retrouvé une corrélation significative entre la GaitSD et la force musculaire. De plus, l'étude de Chang et al. (2013) semble en accord sur le fait que la faiblesse musculaire interférerait avec le contrôle moteur volontaire et entraînerait des contractions musculaires isométriques plus variables. Au vu de ces observations, il semblerait pertinent d'investiguer davantage l'association entre la GaitSD et la force musculaire dans une plus grande cohorte de patients post-AVC.

5.4. Limites de l'étude

La présente étude comporte plusieurs limites.

Premièrement, la petite taille de l'échantillon représente la principale limite de ce travail diminuant ainsi la puissance de l'étude et la généralisation à la population. Par ailleurs, les potentiels facteurs de confusion, comme l'âge, n'ont pas pu être contrôlés dans nos analyses.

Deuxièmement, une autre limite retrouvée dans ce travail est l'utilisation des scores composites de Papageorgiou et al. (2019) pour résumer les déficiences cliniques en un seul score. En effet, cette méthode n'a pas été validée pour une population AVC. De plus, les scores composites sont composés uniquement de mesures prises dans le plan sagittal car il est plus fiable que les autres plans. Le plan transverse et le plan frontal sont laissés de côté car ils présentent une pauvre répétabilité due à la variation de l'alignement des marqueurs (Papageorgiou et al., 2019). Pourtant, les mouvements d'abduction et adduction de la hanche

auraient mérité d'être intégrés dans l'analyse car ils tiennent un rôle important dans la marche et permettent de maintenir l'équilibre, gérer les obstacles et éviter les chutes (Allet et al., 2012).

Troisièmement, le calcul de la GaitSD peut comporter plusieurs limites. Tout d'abord, celui-ci a été réalisé chez des personnes saines et des enfants atteints de paralysie cérébrale. Il n'a toutefois pas été évalué et validé pour des personnes ayant eu un AVC. Ensuite, Sangeux et al. (2016) suggèrent que le calcul basé sur six cycles de marche suffit pour une population saine à faible variabilité mais qu'il faudrait dix cycles de marche pour une population à grande variabilité afin d'améliorer la précision de la GaitSD. Par exemple, il aurait pu être intéressant d'utiliser dix cycles de marche pour calculer la GaitSD du participant 5. Des vérifications supplémentaires concernant la fiabilité et la validité ainsi que le nombre de cycles minimum nécessaire aux personnes post-AVC seraient primordiales afin d'utiliser de manière optimale ce score de GaitSD. Finalement, la GaitSD pourrait fournir un score global pratique pour une interprétation rapide des données de l'AQM mais ne donne pas d'informations sur la localisation de la variabilité. L'utilisation de scores par articulation comme les RMSD serait complémentaire au score de la GaitSD afin d'identifier le segment qui fournit le plus de variabilité (Di Marco et al., 2018). Cette identification permettrait d'être plus précis dans la pose des objectifs et moyens de traitement.

Malgré ces limites et en raison du nombre restreint d'études sur le sujet, ce travail amène des premiers résultats intéressants à confirmer ou infirmer ultérieurement.

5.5. Implications futures

5.5.1. *Perspectives cliniques*

L'analyse quantifiée de la marche fournit des données quantitatives intéressantes pour comprendre et expliquer les troubles de la marche post-AVC, évaluer l'effet d'un traitement sur la marche d'un patient et proposer une prise en charge thérapeutique adaptée. Elle se montre complémentaire au bilan physiothérapeutique lorsque les troubles de la marche sont complexes (Armand et al., 2015; Carcreff et al., 2016).

Un des avantages réside dans le fait que l'AQM donne accès à des données jusqu'alors impossibles à quantifier telles que la variabilité intrinsèque cinématique. L'analyse de cette variabilité apporte une information clinique pertinente pour la compréhension des déviations de la marche et fournit un indice clinique de l'instabilité et du risque de chute lors de la marche (Hausdorff, 2005).

Étant donné qu'un grand nombre de mesures existe dans l'évaluation de la variabilité cinématique, il paraît difficile d'obtenir rapidement une compréhension globale de la marche

du patient (Di Marco et al., 2018). Il semblerait qu'un seul paramètre faciliterait l'ensemble du processus d'interprétation et pourrait être utile en première instance pour évaluer les effets de la rééducation de la marche et pour suivre l'évolution du schéma de marche dans le temps. La GaitSD pourrait être ce type d'outil. Elle exprimerait la variabilité cinématique en un seul score et aurait l'avantage d'être fiable à partir de six cycles de marche (Sangeux et al., 2016). La GaitSD, nécessitant moins de distance à marcher que les mesures spatio-temporelles pour être fiable, éviterait donc un effet de la fatigue musculaire sur la qualité de marche et sur la variabilité de l'individu.

L'interprétation de cette GaitSD devrait idéalement être réalisée en équipe interprofessionnelle. Les différents professionnels pourront tenter d'établir le pronostic de récupération, de déterminer si la variabilité est « bonne » ou pathologique et d'évaluer la mise en place de traitements spécifiques. En outre, l'analyse de la GaitSD par côté permettra de différencier les déficiences primaires des stratégies compensatoires. Différents facteurs influençant la marche et sa variabilité tels que la vitesse de marche devront également être pris en compte dans l'interprétation.

Le score de GaitSD est un marqueur prometteur dans l'évaluation de la marche des patients post-AVC mais nécessiterait d'autres informations plus détaillées sur chacune des articulations afin de définir un traitement plus précis et individualisé au patient.

5.5.2. Propositions de recherche

De futures études devraient être conduites afin d'approfondir la recherche sur la GaitSD qui pourrait être un marqueur indirect clinique intéressant pour évaluer la récupération clinique des patients post-AVC, l'efficacité des traitements réalisés et le risque de chute.

Dans un premier temps, pour utiliser le score de GaitSD de manière efficiente, une étude investiguant sa validité devrait être menée. Elle devrait notamment vérifier sa capacité de discrimination. Elle devrait en outre vérifier son association avec des tests validés de mobilité fonctionnelle et de risque de chute tels que le *Timed Up and Go* ou le *Mini Balance Evaluation Systems Test*.

Par la suite, une étude longitudinale permettrait d'observer l'évolution de la variabilité cinématique. Elle pourrait tenter de déterminer l'état optimal de la variabilité et distinguer la « bonne » variabilité de la variabilité pathologique après un AVC. Elle pourrait également refléter les effets d'interventions physiothérapeutiques telles que la mise en place d'attelles. Ces dernières auraient notamment le potentiel de réduire la variabilité cinématique et d'améliorer la mobilité fonctionnelle (Mohammed et al., 2011).

Finalement, les futures recherches devraient être menées chez des patients post-AVC à différents stades de la maladie et présentant différents niveaux d'atteintes initiales.

6. Conclusion

Cette étude exploratoire démontre que la variabilité cinématique de la marche, représentée par la GaitSD, est plus élevée chez les patients post-AVC comparativement à des participants sains appariés sur l'âge et les caractéristiques anthropométriques. Cette variabilité augmentée, également retrouvée dans la littérature, suggère un lien avec la condition pathologique. L'analyse des valeurs individuelles montre d'ailleurs que la moitié des patients post-AVC se trouvent bien au-dessus du seuil des participants contrôles et suggère donc deux profils de variabilité.

Pourtant, le membre inférieur non parétique n'est pas plus variable que le membre inférieur parétique chez les patients post-AVC, ce qui pourrait refléter des déficits du côté parétique nécessitant la mise en place de mécanismes compensatoires du côté non parétique.

À part pour la vitesse de marche et le GDI, les scores cliniques ne sont pas corrélés avec la variabilité étudiée. Le résultat de l'analyse de corrélation suggère que la vitesse de marche et le GDI devraient être pris en compte dans l'analyse et l'interprétation de la variabilité afin de mieux comprendre l'impact des déficits cliniques et des interventions spécifiques sur ce paramètre.

De futures recherches, incluant des études longitudinales de plus grande ampleur et d'autres mesures de la variabilité, seraient nécessaires pour confirmer ou infirmer ces résultats et évaluer l'effet d'interventions thérapeutiques sur cette variabilité.

Références

- [1] Allet, L., Kim, H., Ashton-Miller, J., De Mott, T., & Richardson, J. K. (2012). Frontal plane hip and ankle sensorimotor function, not age, predicts unipedal stance time. *Muscle & Nerve*, 45(4), 578-585. <https://doi.org/10.1002/mus.22325>
- [2] Antonellis, P., Galle, S., De Clercq, D., & Malcolm, P. (2018). Altering gait variability with an ankle exoskeleton. *PloS One*, 13(10), e0205088. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0205088>
- [3] Armand, S., Bonnefoy-Mazure, A., De Coulon, G., & Hoffmeyer, P. (2015). Analyse quantifiée de la marche : Mode d'emploi. *Revue Médicale Suisse*, 11(490), 1916-1920.
- [4] Baker, R. (2013). *Measuring walking : A handbook of clinical gait analysis*. Mac Keith Press.
- [5] Balaban, B., & Tok, F. (2014). Gait Disturbances in Patients With Stroke. *PM&R*, 6(7), 635-642. <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2013.12.017>
- [6] Balasubramanian, C. K., Neptune, R. R., & Kautz, S. A. (2009). Variability in spatiotemporal step characteristics and its relationship to walking performance post-stroke. *Gait & Posture*, 29(3), 408-414. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2008.10.061>
- [7] Ballester, B. R., Maier, M., Duff, A., Cameirão, M., Bermúdez, S., Duarte, E., Cuxart, A., Rodríguez, S., San Segundo Mozo, R. M., & Verschure, P. F. M. J. (2019). A critical time window for recovery extends beyond one-year post-stroke. *Journal of Neurophysiology*, 122(1), 350-357. <https://doi.org/10.1152/jn.00762.2018>
- [8] Beyaert, C., Vasa, R., & Frykberg, G. E. (2015). Gait post-stroke : Pathophysiology and rehabilitation strategies. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, 45(4), 335-355. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2015.09.005>
- [9] Boudarham, J., Roche, N., Pradon, D., Bonnyaud, C., Bensmail, D., & Zory, R. (2013). Variations in Kinematics during Clinical Gait Analysis in Stroke Patients. *PLoS ONE*, 8(6), e66421. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066421>
- [10] Brun, V., Mousbeh, Z., Jouet-Pastre, B., Benaim, C., Kunnert, J. E., Dhoms, G., d'Angeli-Chevassut, M., Torres, B., & Pélissier, J. (2000). Évaluation clinique de la marche de l'hémiplégique vasculaire : Proposition d'une modification de la functional ambulation classification. *Annales de Réadaptation et de Médecine Physique*, 43(1), 14-20. [https://doi.org/10.1016/S0168-6054\(00\)87937-4](https://doi.org/10.1016/S0168-6054(00)87937-4)

- [11] Carcreff, L., Bonnefoy-Mazure, A., De Coulon, G., & Armand, S. (2016). Analyse quantifiée de la marche. *Movement & Sport Sciences - Science & Motricité*, 93, 7-21. <https://doi.org/10.1051/sm/2015033>
- [12] Chang, S.-H., Francisco, G. E., Zhou, P., Rymer, W. Z., & Li, S. (2013). Spasticity, weakness, force variability, and sustained spontaneous motor unit discharges of resting spastic-paretic biceps brachii muscles in chronic stroke. *Muscle & Nerve*, 48(1), 85-92. <https://doi.org/10.1002/mus.23699>
- [13] Chau, T., Young, S., & Redekop, S. (2005). Managing variability in the summary and comparison of gait data. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2(1), 22. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-2-22>
- [14] Chisholm, A. E., Makepeace, S., Inness, E. L., Perry, S. D., McIlroy, W. E., & Mansfield, A. (2014). Spatial-Temporal Gait Variability Poststroke : Variations in Measurement and Implications for Measuring Change. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 95(7), 1335-1341. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2014.02.014>
- [15] Davis, R. B., Öunpuu, S., Tyburski, D., & Gage, J. R. (1991). A gait analysis data collection and reduction technique. *Human Movement Science*, 10(5), 575-587. [https://doi.org/10.1016/0167-9457\(91\)90046-Z](https://doi.org/10.1016/0167-9457(91)90046-Z)
- [16] Dhawale, A. K., Smith, M. A., & Ölveczky, B. P. (2017). The Role of Variability in Motor Learning. *Annual Review of Neuroscience*, 40, 479-498. <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-072116-031548>
- [17] Di Marco, R., Scalona, E., Pacilli, A., Cappa, P., Mazzà, C., & Rossi, S. (2018). How to choose and interpret similarity indices to quantify the variability in gait joint kinematics. *International Biomechanics*, 5(1), 1-8. <https://doi.org/10.1080/23335432.2018.1426496>
- [18] Dingwell, J. B., & Marin, L. C. (2006). Kinematic variability and local dynamic stability of upper body motions when walking at different speeds. *Journal of Biomechanics*, 39(3), 444-452. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2004.12.014>
- [19] Dingwell, J., Cusumano, J. P., Cavanagh, P., & Sternad, D. (2001). Local dynamic stability versus kinematic variability of continuous overground and treadmill walking. *J. Biomech. Eng.*, 123(1), 27-32.
- [20] Estep, A., Morrison, S., Caswell, S., Ambegaonkar, J., & Cortes, N. (2018). Differences in pattern of variability for lower extremity kinematics between walking and running. *Gait & Posture*, 60, 111-115. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.11.018>
- [21] Fabrication Entreprises Inc. (2017). *Semmes-Weinstein Monofilaments Instructions*.
Health Products For You.

<https://www.healthproductsforyou.com/ProdImages/CommonFile/Semmes-Weinstein%20Monofilaments%20Instructions.PDF>

- [22] Ferrari, A., Cutti, A. G., & Cappello, A. (2010). A new formulation of the coefficient of multiple correlation to assess the similarity of waveforms measured synchronously by different motion analysis protocols. *Gait & Posture*, 31(4), 540-542. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2010.02.009>
- [23] Fotiadou, S., Aggeloussis, N., Gourgoulis, V., Malliou, P., Papanas, N., Giannakou, E., Iliopoulos, I., Vadikolias, K., Terzoudi, A., & Piperidou, H. (2018). Reproducibility of gait kinematics and kinetics in chronic stroke patients. *NeuroRehabilitation*, 42(1), 53-61. <https://doi.org/10.3233/NRE-172195>
- [24] Fusco, N. (2008). *Analyse, modélisation et simulation de la marche pathologique*.
- [25] Guzik, A., & Drużbicki, M. (2020). Application of the Gait Deviation Index in the analysis of post-stroke hemiparetic gait. *Journal of Biomechanics*, 99, 109575. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2019.109575>
- [26] Guzik, A., Drużbicki, M., Przysada, G., Wolan-Nieroda, A., Szczepanik, M., Bazarnik-Mucha, K., & Kwolek, A. (2019). Validity of the gait variability index for individuals after a stroke in a chronic stage of recovery. *Gait & Posture*, 68, 63-67. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.11.014>
- [27] HAS. (2012). *Accident vasculaire cérébral : Méthodes de rééducation de la fonction motrice chez l'adulte*.
- [28] Hausdorff, J. M. (2005). Gait variability : Methods, modeling and meaning. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2(1), 19. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-2-19>
- [29] Herzfeld, D. J., & Shadmehr, R. (2014). Motor variability is not noise, but grist for the learning mill. *Nature Neuroscience*, 17(2), 149-150. <https://doi.org/10.1038/nn.3633>
- [30] Iosa, M., Cereatti, A., Merlo, A., Campanini, I., Paolucci, S., & Cappozzo, A. (2014). Assessment of Waveform Similarity in Clinical Gait Data : The Linear Fit Method. *BioMed Research International*, 2014, e214156. <https://doi.org/10.1155/2014/214156>
- [31] JCGM. (2008). *Evaluation of measurement data – guide to the expression of uncertainty in measurement*.
- [32] JCGM. (2012). *Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés. 3e édition*.
- [33] Kadaba, M. P., Ramakrishnan, H. K., Wootten, M. E., Gaine, J., Gorton, G., & Cochran, G. V. B. (1989). Repeatability of kinematic, kinetic, and electromyographic data in normal

- adult gait. *Journal of Orthopaedic Research*, 7(6), 849-860.
<https://doi.org/10.1002/jor.1100070611>
- [34] Kim, W.-S., Choi, H., Jung, J.-W., Yoon, J. S., & Jeoung, J. H. (2021). Asymmetry and Variability Should Be Included in the Assessment of Gait Function in Poststroke Hemiplegia With Independent Ambulation During Early Rehabilitation. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 102(4), 611-618.
<https://doi.org/10.1016/j.apmr.2020.10.115>
- [35] Langhorne, P., Bernhardt, J., & Kwakkel, G. (2011). Stroke rehabilitation. *The Lancet*, 377(9778), 1693-1702. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(11\)60325-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(11)60325-5)
- [36] Laurent, K., De Sèze, M.-P., Delleci, C., Koleck, M., Dehail, P., Orgogozo, J.-M., & Mazaux, J.-M. (2011). Assessment of quality of life in stroke patients with hemiplegia. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 54(6), 376-390.
<https://doi.org/10.1016/j.rehab.2011.06.002>
- [37] Leboeuf, F., Baker, R., Barré, A., Reay, J., Jones, R., & Sangeux, M. (2019). The conventional gait model, an open-source implementation that reproduces the past but prepares for the future. *Gait & Posture*, 69, 235-241.
<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.04.015>
- [38] Lindsay, M. P., Norrving, B., Sacco, R. L., Brainin, M., Hacke, W., Martins, S., Pandian, J., & Feigin, V. (2019). World Stroke Organization (WSO): Global Stroke Fact Sheet 2019. *International Journal of Stroke*, 14(8), 806-817.
<https://doi.org/10.1177/1747493019881353>
- [39] Medical Research Council. (1977). Aids to the Examination of the Peripheral Nervous System. *British Medical Bulletin*, 33(2), 182-182.
<https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.bmb.a071428>
- [40] Milovanović, I., & Popović, D. B. (2012). Principal component analysis of gait kinematics data in acute and chronic stroke patients. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2012, 649743. <https://doi.org/10.1155/2012/649743>
- [41] Mizuta, N., Hasui, N., Nakatani, T., Takamura, Y., Fujii, S., Tsutsumi, M., Taguchi, J., & Morioka, S. (2020). Walking characteristics including mild motor paralysis and slow walking speed in post-stroke patients. *Scientific Reports*, 10, 11819.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-68905-3>
- [42] Mohammed, U., Twycross-Lewis, R., Timotijevic, T., Woledge, R., Bader, D., Paterson, M., Coggings, D., & Morrissey, D. (2011). Variability of kinematic and kinetic gait data in ambulatory children with spastic cerebral palsy with and without fixed ankle-foot

- orthoses using 3d motion analysis : A quantitative prospective study. *British Journal of Sports Medicine*, 45(2), e1-e1. <https://doi.org/10.1136/bjism.2010.081554.19>
- [43] Mühl, A., & Vuadens, P. (2011). Intérêt et coût de la réadaptation neurologique des patients cérébrolésés. *Revue Médicale Suisse*, 293. <https://www.revmed.ch/revue-medicale-suisse/2011/revue-medicale-suisse-293/interet-et-cout-de-la-readaptation-neurologique-des-patients-cerebroleses>
- [44] OBSAN. (2021). *Attaques cérébrales*. <https://www.obsan.admin.ch/fr/indicateurs/attaques-cerebrales>
- [45] OMS (Éd.). (2001). *Classification internationale du fonctionnement, du handicap et de la santé : CIF*.
- [46] OMS. (2021a). *Accident vasculaire cérébral (AVC)*. WHO; World Health Organization. https://www.who.int/topics/cerebrovascular_accident/fr/
- [47] OMS. (2021b). *Accident vasculaire cérébral, thèmes de santé*. <http://www.emro.who.int/fr/health-topics/stroke-cerebrovascular-accident/index.html>
- [48] Palermo, E., Rossi, S., Marini, F., Patanè, F., & Cappa, P. (2014). Experimental evaluation of accuracy and repeatability of a novel body-to-sensor calibration procedure for inertial sensor-based gait analysis. *Measurement*, 52, 145-155. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.03.004>
- [49] Papageorgiou, E., Simon-Martinez, C., Molenaers, G., Ortibus, E., Campenhout, A. V., & Desloovere, K. (2019). Are spasticity, weakness, selectivity, and passive range of motion related to gait deviations in children with spastic cerebral palsy? A statistical parametric mapping study. *PLOS ONE*, 14(10), e0223363. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223363>
- [50] Pollock, A., Baer, G., Campbell, P., Choo, P. L., Forster, A., Morris, J., Pomeroy, V. M., & Langhorne, P. (2014). Physical rehabilitation approaches for the recovery of function and mobility following stroke. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*, 4, CD001920. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD001920.pub3>
- [51] Riley, M. A., & Turvey, M. T. (2002). Variability and Determinism in Motor Behavior. *Journal of Motor Behavior*, 34(2), 99-125. <https://doi.org/10.1080/00222890209601934>
- [52] Rutz, D. (2021). *La variabilité cinématique intrinsèque de la marche chez les enfants et les jeunes adultes avec une paralysie cérébrale : Considérations méthodologiques et cliniques*.

- [53] Sangeux, M., Passmore, E., Graham, H. K., & Tirosh, O. (2016). The gait standard deviation, a single measure of kinematic variability. *Gait & Posture*, *46*, 194-200. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2016.03.015>
- [54] Schwartz, M. H., & Rozumalski, A. (2008). The gait deviation index: A new comprehensive index of gait pathology. *Gait & Posture*, *28*(3), 351-357. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2008.05.001>
- [55] Schwartz, M. H., Trost, J. P., & Wervej, R. A. (2004). Measurement and management of errors in quantitative gait data. *Gait & Posture*, *20*(2), 196-203. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2003.09.011>
- [56] Sheffler, L. R., & Chae, J. (2015). Hemiparetic Gait. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics*, *26*(4), 611-623. <https://doi.org/10.1016/j.pmr.2015.06.006>
- [57] Shirley Ryan AbilityLab. (2021). *6 Minute Walk Test*. Shirley Ryan AbilityLab. <https://www.sralab.org/rehabilitation-measures/6-minute-walk-test>
- [58] Shirley Ryan AbilityLab. (2022a). *10 Meter Walk Test*. Shirley Ryan AbilityLab. <https://www.sralab.org/rehabilitation-measures/10-meter-walk-test>
- [59] Shirley Ryan AbilityLab. (2022b). *Ashworth Scale / Modified Ashworth Scale*. Shirley Ryan AbilityLab. <https://www.sralab.org/rehabilitation-measures/ashworth-scale-modified-ashworth-scale>
- [60] Shirley Ryan AbilityLab. (2022c). *Mini Balance Evaluation Systems Test*. Shirley Ryan AbilityLab. <https://www.sralab.org/rehabilitation-measures/mini-balance-evaluation-systems-test>
- [61] Shirley Ryan AbilityLab. (2022d). *Timed Up and Go*. Shirley Ryan AbilityLab. <https://www.sralab.org/rehabilitation-measures/timed-and-go>
- [62] Sibley, K. M., Tang, A., Brooks, D., & McIlroy, W. E. (2008). Effects of extended effortful activity on spatio-temporal parameters of gait in individuals with stroke. *Gait & Posture*, *27*(3), 387-392. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2007.05.007>
- [63] Sibley, K. M., Tang, A., Patterson, K. K., Brooks, D., & McIlroy, W. E. (2009). Changes in spatiotemporal gait variables over time during a test of functional capacity after stroke. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, *6*, 27. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-6-27>
- [64] Spiegel, M. R., Ergas, A., & Marcotorchino, J.-F. (1972). *Théorie et application de la statistique*. McGraw-Hill.

- [65] Srinivasan, D., & Mathiassen, S. E. (2012). Motor variability in occupational health and performance. *Clinical Biomechanics*, 27(10), 979-993. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2012.08.007>
- [66] Stergiou, N., & Decker, L. M. (2011). Human movement variability, nonlinear dynamics, and pathology: Is there a connection? *Human Movement Science*, 30(5), 869-888. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2011.06.002>
- [67] Stergiou, N., Harbourne, R., & Cavanaugh, J. (2006). Optimal movement variability: A new theoretical perspective for neurologic physical therapy. *Journal of Neurologic Physical Therapy: JNPT*, 30(3), 120-129. <https://doi.org/10.1097/01.npt.0000281949.48193.d9>
- [68] Straudi, S., Manca, M., Aiello, E., Ferraresi, G., Cavazza, S., & Basaglia, N. (2009). Sagittal plane kinematic analysis of the six-minute walk test: A classification of hemiplegic gait. *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine*, 45(3), 341-347.
- [69] Suda, M., Kawakami, M., Okuyama, K., Ishii, R., Oshima, O., Hijikata, N., Nakamura, T., Oka, A., Kondo, K., & Liu, M. (2021). Validity and Reliability of the Semmes-Weinstein Monofilament Test and the Thumb Localizing Test in Patients With Stroke. *Frontiers in Neurology*, 11. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fneur.2020.625917>
- [70] Tabard-Fougère, A., Rutz, D., Pouliot-Laforte, A., De Coulon, G., Newman, C. J., Armand, S., & Wegrzyk, J. (2022). Are Clinical Impairments Related to Kinematic Gait Variability in Children and Young Adults With Cerebral Palsy? *Frontiers in Human Neuroscience*, 16, 816088. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.816088>
- [71] Veerbeek, J., van Wegen, E., Peppen, R. P. S., Hendriks, E., Rietberg, M. B., Wees, Ph. J., Heijblom, K., Goos, A. A. G., Hanssen, W. O., Wel, B. C., Jong, L. D., Kamphuis, J., Noom, M. M., Schaft, R., Smeets, C. J., Vluggen, T., Vijsma, D. R. B., Vollmar, C. M., & Kwakkel, G. (2014). *KNGF Clinical Practice Guideline for Physical Therapy in Patients With Stroke*.
- [72] Winter, D. A. (1984). Kinematic and kinetic patterns in human gait: Variability and compensating effects. *Human Movement Science*, 3(1), 51-76. [https://doi.org/10.1016/0167-9457\(84\)90005-8](https://doi.org/10.1016/0167-9457(84)90005-8)
- [73] Wonsetler, E. C., & Bowden, M. G. (2017). A systematic review of mechanisms of gait speed change post-stroke. Part 2: Exercise capacity, muscle activation, kinetics, and kinematics. *Topics in Stroke Rehabilitation*, 24(5), 394-403. <https://doi.org/10.1080/10749357.2017.1282413>

- [74] Wu, H. G., Miyamoto, Y. R., Gonzalez Castro, L. N., Ölveczky, B. P., & Smith, M. A. (2014). Temporal structure of motor variability is dynamically regulated and predicts motor learning ability. *Nature Neuroscience*, *17*(2), 312-321. <https://doi.org/10.1038/nn.3616>

Annexes

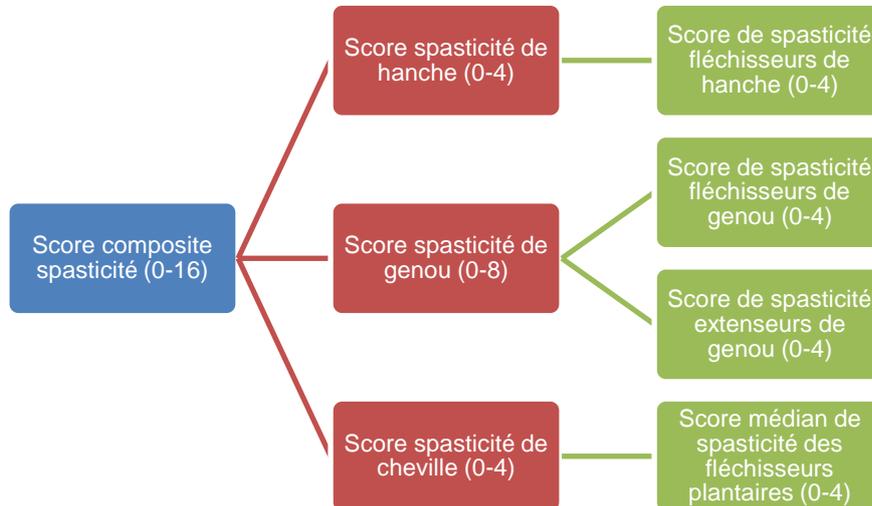
Annexe 1 : Evaluation de la variabilité cinématique

Nom	Définition	Avantages	Inconvénients	Tiré de
Standard Deviation (SD)	Dispersion autour de la moyenne (racine carrée de la variance)	Facile d'utilisation et même unité que celle mesurée	Pas d'information sur la dispersion autour de la moyenne	Spiegel et al., 1972
Coefficient of Variation (CV)	Mesure de dispersion en pourcentage, écart type divisé par la moyenne	Facile d'interprétation en pourcentage	Pas sensibles aux changements du signal dans le temps, minimum 15 cycles nécessaires.	Estep et al., 2018; Sangeux et al., 2016; Winter, 1984
Root Mean Square Deviation (RMSD)	Représente la racine carrée de la variance, évaluée échantillon par échantillon, entre les courbes et la courbe moyenne sur le cycle de la marche	Détection de la variation du ROM, le ROM et le décalage temporel de la courbe	Décalage temporel influence les autres variations et ne peut pas discriminer les différents facteurs de confusion	Di Marco et al., 2018; JCGM, 2008, 2012
Mean Absolute Variability (MAV)	Mesure la moyenne des déviations absolues minimum et maximum par rapport à un point central d'une série statistique (courbes comparées)			Di Marco et al., 2018; Ferrari et al., 2010; Palermo et al., 2014
Coefficient of Multiple Correlation (CMC)	Evalue la répétabilité des formes d'onde et représente la racine carrée du coefficient de détermination multiple ajusté	Courbe entière prise en compte, sensible aux variations simultanées, à la forme de la courbe et au décalage temporel	Influence de la taille d'échantillon, peu sensible au changement de ROM (5 à 60°), pas de corrélation quand le décalage entre les courbes et dans le temps est trop important. Risque de mauvaises interprétations.	Di Marco et al., 2018; Kadaba et al., 1989
Linear Fit Method (LFM)	Calcule la régression linéaire entre un ensemble de courbes et une courbe moyenne de référence, en renvoyant des informations séparées sur la variation de marche par rapport à sa référence (a1), le décalage moyen pondéré (a0) et la justesse de la relation linéaire entre eux (R2)	Sensible à la variation d'amplitude, au décalage de la courbe et dans le temps	Pas de variation en changeant le ROM, décalage temporel influence les autres variations	Di Marco et al., 2018; Iosa et al., 2014
Gait Standard Deviation (GaitSD)	Racine carrée de la variance moyenne sur les variances des variables cinématiques (moyenne/score des déviations standards)	Résume globalement la variabilité cinématique d'une personne en un seul nombre. Peu sensible au nombre de cycles et généralement stable dès 5 cycles.	Une seule mesure, ne mesure pas les articulations de manière individuelle	Sangeux et al., 2016

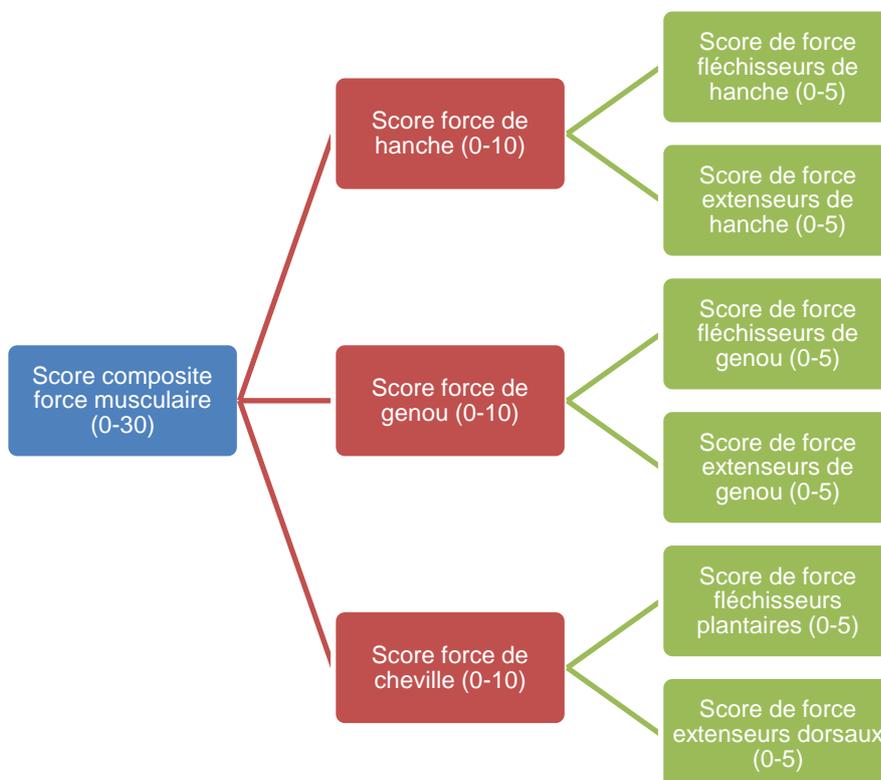
Annexe 2 : Scores composites

En gris : le score recueilli lors de l'examen clinique ; en orange : le score articulaire ; en bleu : le score composite total.

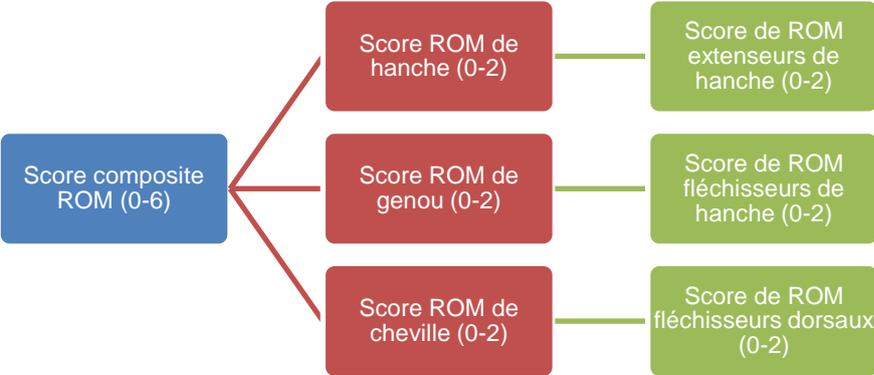
Spasticité



Force musculaire



Amplitude de mouvement (ROM)



Sensibilité

