

Faculté des sciences de la motricité

Observation des paramètres spatio-temporels, de transition du pas et du modèle pendulaire de la marche à 4 km.h⁻¹ en fonction de l'âge et du niveau d'activité physique

Étude observationnelle transversale

Auteurs : Lecoubet Néo et Samain Antoine

Promoteur(s) : Dewolf Arthur

Année académique 2023-2024

Master en kinésithérapie et réadaptation [60.0] - KINE2M

Remerciements

Nous souhaitons remercier toutes les personnes qui ont contribué à ce mémoire ;

Merci au Professeur Arthur Dewolf pour l'encadrement, pour l'opportunité de découverte de la recherche expérimentale grâce à ce projet et surtout pour sa disponibilité et son accompagnement de grande qualité.

« También queremos dar las gracias a Mario Núñez Lisboa por su ayuda en la recogida y el análisis de los datos, y por todos sus valiosos consejos y explicaciones. » Traduction : Nous remercions également Mario Núñez Lisboa pour son aide dans la récolte et l'analyse des données ainsi que tous ses précieux conseils et explications.

Merci aux membres du Laboratoire de Biomécanique et Physiologie de la locomotion humaine (LOCO - UCLouvain) pour leur partage d'expertise et leur accueil durant les périodes de prises de mesures.

Nous remercions chaleureusement toutes les participantes et tous les participants pour le temps accordé et l'aide précieuse apportée pour la réalisation de cette étude expérimentale.

Merci à nos familles et nos proches pour le soutien durant cette période et pour la relecture de ce travail.

Nous tenions également à vous remercier, vous, lecteurs de ce mémoire pour le temps et l'intérêt accordés à notre production.

Abréviations

- AP = Activité physique
 - AVJ = Activités de la vie journalière
 - BW = Bodyweight ou poids corporel *en français*
 - CEHF = Comité d’Ethique Hospitalo-Facultaire
 - CoM = Centre de masse
 - CV = Coefficient de variation
 - CP = Contact du pied
 - DC = double contact
 - ddl = Degrés de liberté
 - DO = Décollement des orteils
 - Ecom = Energie totale du centre de masse
 - Ek = Energie cinétique
 - Ep = Energie potentielle
 - et al. = et les autres
 - F_{vANT} = Force verticale maximale de la jambe antérieure
 - F_{ddl} = Statistique du test de type III de l’effet fixe du modèle mixte linéaire
 - F_{vPOST} = Force verticale maximale de la jambe postérieure
 - Freq = Fréquence de foulée
 - GPAQ = Global Physical Activity Questionnaire
 - GRF = Ground reaction force ou force de réaction du sol *en français*
 - H = Statistique du test non-paramétrique de Kruskal-Wallis
 - IMC = Indice de masse corporelle
 - Lf = Longueur de foulée
 - LMM = Linear mixed model ou modèle linéaire mixte *en français*
 - MET = Metabolic equivalent of task ou équivalent métabolique d’une tâche *en français*
 - OA = Older Adults ou adultes plus âgés en français (+ de 65 ans)
 - OA_{+a} = Adultes plus âgés plus actifs physiquement
 - OA_{-a} = Adultes plus âgés moins actifs physiquement
 - OMS = Organisation Mondiale de la Santé
 - ONU = Organisation des Nations Unies
 - p*_{bonf} = P-valeur de la correction de Bonferroni
 - Rec = Recovery
 - RFD = Taux de développement de la force
 - sig. = niveau de signification
 - STROBE = Strengthening the reporting of observational studies in epidemiology
 - T_{V_{min}} = Temps d’apparition de V_{vmin} relatif au contact du pied
 - Tc = Temps de contact
 - To = Temps d’oscillation
 - U = Statistique du test non-paramétrique de Mann-Whitney
 - UCL = Université catholique de Louvain-la-Neuve
 - vf = version française
 - V_v = Vitesse verticale du centre de masse
 - V_{vmin} = Vitesse verticale minimale du centre de masse
 - Wcom = Travail externe total du centre de masse
 - Wcom_norm = Travail externe total du centre de masse normalisé
 - Wk = Travail cinétique
 - Wk_norm = Travail cinétique normalisé
 - Wp = Travail potentiel
 - Wp_norm = Travail potentiel normalisé
 - YA = Young Adults ou jeunes adultes en français (20 à 35 ans)
 - YA_{+a} = Jeunes adultes plus actifs physiquement
 - YA_{-a} = Jeunes adultes moins actifs physiquement
 - χ^2 = Statistique du test khi-deux de Pearson sur les proportions
-

Table des matières

I.	INTRODUCTION.....	1
II.	MATÉRIELS ET MÉTHODES.....	6
2.1	SÉLECTION DES SUJETS ET PROCÉDURE :	6
2.2	OUTILS D'ANALYSE	8
2.3	ANALYSES STATISTIQUES :	9
III.	RÉSULTATS	11
3.1	PARAMÈTRES SPATIO-TEMPORELS.....	12
3.2	TRANSITION DU PAS	13
3.3	MÉCANISME PENDULAIRE DE LA MARCHÉ	15
IV.	DISCUSSION	17
V.	LIMITATIONS	22
VI.	CONCLUSION.....	24
VII.	ANNEXES.....	25
1.	ANNEXE A : AVIS DU COMITÉ D'ÉTHIQUE HOSPITALO-FACULTAIRE	25
2.	ANNEXE B : CHECKLIST GUIDELINES STROBE (2014)	26
3.	ANNEXE C : CRITÈRES DE SÉLECTION DES PARTICIPANTS.....	27
4.	ANNEXE D : VERSION 2.0 DU GPAQ.....	29
5.	ANNEXE E : STATISTIQUES DES 3 DOMAINES D'INTÉRÊT POUR CHAQUE GROUPE	31
6.	ANNEXE F : STATISTIQUES DES 3 DOMAINES D'INTÉRÊT POUR L'ÂGE ET LE NIVEAU D'ACTIVITÉ PHYSIQUE.....	32
7.	ANNEXE G : RÉSUMÉ DES DIFFÉRENCES STATISTIQUEMENT SIGNIFICATIVES ENTRE GROUPES.....	33
VIII.	BIBLIOGRAPHIE	34

I. Introduction

Au vu de la tendance du vieillissement de la population mondiale, les personnes âgées de plus de 65 ans, représentant 1 personne sur 10 dans le monde en 2021, soit 761 millions de personnes, représenteront 1 personne sur 6 en 2050, soit une projection potentielle de 1,6 milliard de personnes (United Nations, 2023). L'évolution de cette partie de la population constitue une préoccupation pour nos sociétés et les organisations internationales telles que l'Organisation des Nations Unies (ONU) et l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Cela s'illustre notamment par la proclamation, lors de l'assemblée générale des Nations Unies du 14 décembre 2020, des années 2021-2030 comme Décennie du vieillissement en bonne santé (Décennie des Nations Unies pour le vieillissement en bonne santé (2021-2030), 2020).

En 2009, Chodzko-Zajko J. Wojtek et al. soulignent qu'avec le vieillissement, une série de systèmes physiologiques accusent des modifications structurelles et fonctionnelles. En conséquence, les activités de la vie journalière (AVJ) et l'indépendance physique des personnes âgées subissent les répercussions de ces changements, touchant de nombreuses fonctions et de nombreux tissus et organes, entraînant alors une composition corporelle modifiée et une diminution des capacités fonctionnelles (Chodzko-Zajko et al., 2009). Par exemple, selon la revue de Gonzalez-Freire et al. (2014), les modifications structurelles et fonctionnelles des jonctions neuro-musculaires provoquent une diminution des neurones moteurs, surtout pour les fibres musculaires de type II, avec un remodelage des unités motrices. Ces changements pourraient jouer un rôle dans le déclin de la masse et de la force des muscles squelettiques (Gonzalez-Freire et al., 2014). En outre, Clark et al. (2013) indiquent l'existence d'un seuil d'activation musculaire à partir duquel une détérioration des capacités fonctionnelles serait observée. Les diminutions d'activation neuromusculaire et de puissance surviendraient avant le déclin de la capacité de déplacement (Clark et al., 2013). Plus récemment Hunter et al. (2016) ont mis en évidence que la performance motrice est impactée par ces

modifications qui provoquent, entre autres, une diminution de la force et de la puissance maximales, de la vitesse de raccourcissement, du taux de développement de la force (RFD) et de la constance dans la production de force, ainsi qu'une plus grande fatigabilité. Les auteurs soulignent qu'avec l'âge une grande variabilité intra- et inter- sujet existe au niveau du déclin de la force, de la vitesse, de la fatigue et d'autres composantes de la performance motrice (Hunter et al., 2016). Une partie de cette variabilité peut être liée à la pratique d'activité physique au cours de la vie. En effet, un juste dosage d'activation musculaire par une activité physique serait bénéfique pour contrecarrer ces modifications mais en veillant à ne pas dépasser les capacités, diminuées avec l'âge, de remodelage et de plasticité des Unités Motrices afin d'éviter un effet inverse à celui escompté (Hepple & Rice, 2016).

Selon une revue systématique de Paterson et al. (2010), les personnes âgées représentent l'un des groupes de population le moins actif physiquement et l'un des plus sédentaires (Paterson & Warburton, 2010). Les personnes de plus de 60 ans auraient un comportement sédentaire, défini par le Sedentary Behaviour research network tel que « des comportements éveillés avec une dépense énergétique inférieure ou égale à 1,5 metabolic equivalent of task (MET), comme être en position assise ou allongée » (Sedentary Behaviour Research, 2012), durant 8,5 à 9,6 heures par jour en moyenne, soit 60 à 80% de leurs temps éveillés (Wullems et al., 2016). Cependant, Godfrey et al (2012) attirent l'attention sur l'influence de la retraite car pour des individus du même âge, les retraités ont moins de temps total de comportements sédentaires et plus de temps actif que les employés surtout pour les groupes moins âgés (<65 ans et 65-70 ans). Néanmoins, au sein des participants retraités, les comportements sédentaires augmentent en fonction de l'âge d'où l'intérêt d'essayer de changer ces comportements sédentaires et de promouvoir les activités physiques d'intensité faible à modérée (Godfrey et al., 2014).

Les pertes de fonction et les maladies chroniques associées au vieillissement ont pour conséquence que nombres d'entre eux se situent proche d'un niveau de capacités physiques qui les prive d'indépendance

(Paterson & Warburton, 2010). Dans une population de femmes âgées de 65 à 75 ans, Ciprandi D. et al. (2017) ont trouvé que la variabilité à la marche et le niveau d'activité physique sont associés négativement. En effet, les participantes possédant une variabilité faible à modérée totalisaient un niveau d'activité physique recommandé (Ciprandi et al., 2017). La pratique d'activité physique ainsi que l'historique d'activité physique au cours de la vie pourraient dès lors avoir un impact conséquent sur l'impact du vieillissement sur les fonctions motrices des personnes âgées, en particulier sur la marche.

Le nombre de chutes est plus important et plus grave chez la personne âgée que chez la personne jeune (Drieskens et al., 2018). C'est également le cas si l'on compare deux personnes d'âges similaires avec des niveaux d'activités physiques différents (Sherrington et al., 2019). Selon Studenski et al. (2011), la marche et plus particulièrement la vitesse de marche est un paramètre vital, ainsi adapter les techniques de prévention pourrait permettre à une population mondiale vieillissante une meilleure condition de vie et une longévité plus importante.

La marche est un élément essentiel de la mobilité et de la qualité de vie chez les individus de tous âges, plus particulièrement chez les personnes âgées. En effet, à cause du processus naturel de vieillissement, la locomotion et la stabilité peuvent subir des modifications significatives (Vogel et al., 2009). Il est donc impératif de comprendre les différents changements du pattern moteur afin d'élaborer des stratégies de prévention et de réhabilitation efficaces. Des modifications ont été documentées avec l'âge. Parallèlement, Aboutorabi A. et al. (2015) mettent en évidence que l'augmentation de la cadence, du temps de double contact et de la largeur du pas, associés à une altération de l'équilibre et une faiblesse musculaire, sont des adaptations préférentielles de la personne âgée. Cela permet d'améliorer le contrôle global de la position en minimisant les mouvements médio-latéraux du centre de masse et de réduire l'instabilité causée par une variabilité dans la démarche grandissante (Aboutorabi et al., 2015). Dans cet objectif, Lord S. et al. (2013) proposent 5 paramètres importants pour analyser la marche : 1) la vitesse (vitesse du pas), 2) le rythme (temps du

pas), 3) la variabilité de vitesse de pas, 4) l'asymétrie dans la phase d'oscillation et 5) l'asymétrie de longueur et de largeur du pas (Lord et al., 2013). De plus, chez la personne âgée, la phase de transfert du poids corporel et plus particulièrement les variations de vitesse du centre de masse corporel (CoMv) durant la transition d'un pas à l'autre pourraient également être un élément clé de la marche (Meurisse et al., 2019b). Après que Chastan et al. (2009) ont identifié dans leurs études un mode de transition d'un pas à l'autre actif et passif, principalement chez les patients atteints par la maladie de parkinson (Chastan, Do, et al., 2009; Chastan, Westby, et al., 2009). En appliquant la même classification aux personnes âgées, Meurisse et al. (2019b) ont constaté que ceux-ci utilisaient une transition passive en plus grande proportion. Une transition est considérée comme active quand la redirection du centre de masse apparaît avant le double contact (Chong et al., 2009; Dewolf et al., 2022). D'autres auteurs se sont intéressés à l'effet des afférences sensorielles (Chastan et al., 2010), de la vitesse de marche (Meurisse et al., 2019a) et de l'âge (Chong et al., 2009; Dewolf et al., 2022; Meurisse et al., 2019b; Nunez-Lisboa et al., 2023) sur les modes de transition actif ou anticipé et passif ou non-anticipé. L'occurrence du mode de transition non-anticipé (ou passif) est également plus importante chez les enfants, les patients atteints par des maladies neurologiques et les personnes âgées avec des modifications de l'équilibre.

La manière dont la pratique d'une activité physique pourrait potentiellement modifier l'effet de l'âge durant la marche est un sujet qui reste à explorer. Egerton T. et al. (2017) se sont intéressés à différentes variables de la marche telles que la vitesse moyenne, la cadence, la longueur et la durée du pas, les temps d'oscillation et de double contact, l'asymétrie et le ratio de marche qui correspond au rapport entre la longueur du pas par la cadence. Ils constatent une association entre le niveau d'activité physique et la vitesse de marche, la longueur et la durée du pas, le ratio de marche, la cadence et le temps d'oscillation. D'une part à vitesse donnée, les compensations pour réduire l'instabilité, comme l'augmentation de la cadence et la réduction des autres variables, sont associées avec des niveaux d'activité physique plus bas. D'autre part, une vitesse de marche diminuée

pourrait être un prédicteur du déclin de participation aux activités sociales ambulatoires (Egerton et al., 2017).

L'objectif de ce présent travail consiste à observer les différences du pattern de marche présentes entre des jeunes adultes (20 à 35ans) et des sujets âgés (plus de 65 ans) en fonction de leur niveau d'activité physique, afin d'observer une potentielle atténuation de l'effet du vieillissement en fonction du niveau d'activité physique. Nous émettons l'hypothèse que nous observerons des modifications des paramètres spatio-temporels et de transition du pas ainsi qu'au niveau du modèle pendulaire de la marche entre les groupes d'âge et que l'altération sera moindre chez les individus plus actifs physiquement que chez leurs homologues moins actifs.

II. Matériels et Méthodes

2.1 Sélection des sujets et procédure :

Tous les participants ont donné leur consentement éclairé par écrit. Avant les expériences, le but et la nature de l'étude ont été expliqués aux sujets. Les expériences ont été réalisées conformément à la déclaration d'Helsinki et ont été approuvées par le comité d'Ethique Hospitalo-Facultaire (CEHF) de Saint-Luc – UCL (Concerné : 2022/22NOV/439 – N° Enregistrement Belge : B4032022000136) (Voir Annexe A). Les guidelines STROBE ont été suivies (Elm et al., 2007; Gedda, 2015). (Voir Annexe B)

Les critères d'inclusions étaient les suivants : pas de douleurs locomotrices, capacité à marcher sans aide, aucun trouble neurologique, pas de blessures survenues dans les six mois précédant l'expérience, pas de prothèse, ainsi qu'avoir entre 18 et 35 ans ou plus de 65ans au moment de l'expérience. (Voir Annexe C)

D'après l'estimation de la taille d'échantillon a priori avec G*POWER© (Faul et al., 2007) et R-package© ($\beta=0.8$, $\alpha=0.05$, taille d'effet = 0.4), une taille de $n=60$ divisée en 4 groupes égaux serait nécessaire. Toutes les expériences ont été réalisées en 2023, entre mars et avril, ainsi qu'entre octobre et novembre, et ont permis de composer un échantillon de commodité de 59 sujets (38 hommes et 21 femmes), répartis en deux groupes d'âges, les jeunes adultes (YA) et les adultes plus âgés (OA), entre 20 et 35ans (moyenne= 25.9 ± 3.5 ans ; $n=31$; amplitude= $20-35$) et plus de 65ans (71.4 ± 5.2 ans ; $n=28$; amplitude= $65-83$).

Figure 1. Classification en groupes

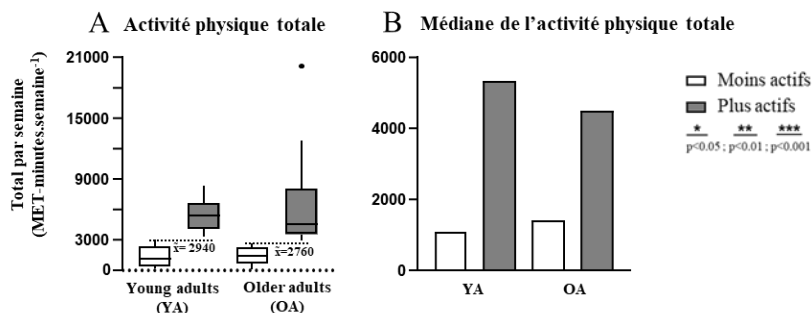


Figure 1. Classification en groupes. (A) Représentation en boxplot de la quantité d'activité physique (MET-minutes.semaine⁻¹) par sujet (ligne pointillée : médiane par groupe d'âge). Les jeunes adultes et les adultes âgés se situant sous leur médiane respective sont définis comme moins actifs (YA_{-a} et OA_{-a}). Les autres, au-dessus de leur médiane, sont définis comme plus actifs (YA_{+a} et OA_{+a}). (B) Comparaison de la médiane selon leur classification d'activité physique (YA_{-a} vs OA_{-a} : $U=96.5, p=0.5313$ et YA_{+a} vs OA_{+a} : $U=93.5, p=0.629$) à l'aide du test non-paramétrique de Mann-Whitney. Blanc : moins actif ; gris : plus actif ; YA : jeunes adultes ; OA : adultes plus âgés.

La version française 2.0 du Global Physical Activity Questionnaire (GPAQ) (Voir Annexe D) a permis de classer les sujets selon leur Metabolic Equivalent of Task d'activité physique par minute (MET-min.semaine⁻¹) lors d'une semaine type (Rivière et al., 2018). La médiane respective des groupes jeunes adultes et adultes plus âgés (à savoir 2940 MET-min.semaine⁻¹ pour les jeunes adultes (YA) et 2760 MET-min.semaine⁻¹ pour les adultes plus âgés (OA), comme illustrée dans la figure 1) a été utilisée pour séparer les participants en 4 groupes homogènes : les sujets jeunes adultes plus actifs physiquement (YA_{+a} ; n=15) et moins actifs physiquement (YA_{-a} ; n=16), ainsi que les sujets adultes plus âgés plus actifs physiquement (OA_{+a} ; n=14) et moins actifs physiquement (OA_{-a} ; n=14).

Les sujets étaient invités à venir au laboratoire Coubertin à Louvain-La-Neuve, Belgique, avec leurs affaires de sport personnelles non réfléchissantes de couleurs sombres (T-shirt, short, chaussettes courtes et chaussures de sport). L'expérience a été encadrée par deux à quatre personnes afin d'en assurer le bon déroulé.

L'expérience était constituée d'une marche sur tapis roulant instrumentalisé à 4 km.h⁻¹ (1.11 m.s⁻¹) car elle permet d'observer de manière optimale les différents modes de transition actifs et inactifs, mais également car c'est à partir de cette vitesse que la méthode de transition du pas diverge entre les personnes jeunes et âgées (Meurisse et al., 2019a, 2019b). Chaque prise de données représente 30 secondes de marche avec un nombre de pas compris entre 21 et 34, excepté pour le sujet SubO04 (11 pas), dont la session a été écourtée. Les enregistrements ont été précédés en amont d'un échauffement de 45 secondes à 2 km.h⁻¹ (0.56 m.s⁻¹) ainsi que d'une période d'adaptation de 15 à 45 secondes à 4 km.h⁻¹ (1.11 m.s⁻¹). Tous les sujets étaient équipés d'un harnais de sécurité durant toute la durée de l'expérience. D'autres enregistrements ont été réalisés durant l'expérience, mais ne seront pas analysés dans le présent mémoire.

La cinématique tridimensionnelle bilatérale de l'ensemble du corps a été enregistrée à 200 Hz au moyen d'un système Qualisys avec 16 caméras placées autour du tapis roulant. 20 marqueurs réfléchissants ont été fixés sur

la peau des sujets au-dessus des points de repère bilatéraux suivants : le processus mastoïde, l'articulation gléno-humérale, l'épicondyle latéral du coude, le processus ulnaire du poignet, l'épine iliaque antéro-supérieure, l'épine iliaque postéro-supérieure, le grand trochanter, l'épicondyle latéral du fémur, la malléole latérale ainsi que sur chaque chaussure en regard de la cinquième articulation métatarso-phalangienne.

2.2 Outils d'analyse

Les forces de réaction du sol ont été enregistrées par quatre transducteurs de force (Arsalis, Belgium) à 1200 Hertz situés aux quatre coins d'un tapis roulant instrumentalisé (h/p/cosmos-Stellar Germany, surface : 1.60x0.65 m). A partir de ces forces, la vitesse et le déplacement du centre de masse ont pu être calculés (Willems & Gosseye, 2013) permettant l'analyse des paramètres spatio-temporels du pas, des forces verticales et des énergies relatives instantanées du mécanisme pendulaire du centre de masse (CoM). Afin d'avoir une analyse efficace, une foulée a donc été définie par deux contacts successifs du pied droit.

Paramètres de marche spatio-temporels : Le temps de contact (Seconde), d'oscillation (s), la période (s), la fréquence de foulée (Hz), ainsi que la longueur de foulée (m).

Forces verticales : L'analyse des forces verticales (F_{VANT} et F_{VPOST}) a permis de différencier les phases de contact, ainsi que les phases d'oscillations afin de mesurer les paramètres spatio-temporels d'intérêts.

Energies relatives instantanées du centre de masse : Les procédures décrites par Willems et Gosseye en 2013, ont permis de déterminer l'accélération, la vitesse, le déplacement et l'énergie du CoM à l'aide des forces de réaction du sol (GRF) (Willems & Gosseye, 2013). La somme algébrique à chaque instant des énergies potentielles (E_p) et cinétiques (E_k) du CoM représente l'énergie du CoM (E_{com}). La somme du travail nécessaire pour augmenter E_{com} est indiquée par W_{com} (Cavagna et al., 1976). La transduction d'énergie se déroule lors de l'augmentation d' E_p et la diminution de E_k (T1), ou l'inverse lors de l'augmentation de E_k et la diminution de E_p (T3). La recovery durant la foulée varie de 0% quand les courbes E_k et E_p sont en phase à 100% quand elles sont en opposition, cela

signifie que l'augmentation d'une courbe équivaut à la diminution de l'autre aboutissant à un transfert d'énergies efficient et une économie de travail externe total positif (W_{com}) à fournir (Cavagna, 2002.; Dewolf et al., 2022; Dewolf et al., 2017). L'ensemble des paramètres a été mesuré à l'aide d'un software MATLAB[®].

2.3 Analyses statistiques :

Toutes les statistiques ont été réalisées avec le logiciel SPSS[®] version 23.0. Les variables indépendantes étaient l'âge et le niveau d'activité physique (AP). Les variables dépendantes réparties en 3 domaines d'intérêts étaient pour les paramètres spatio-temporels : la moyenne pour une foulée du temps de contact (T_c), du temps d'oscillation (T_o), de la fréquence (Freq), de la longueur de foulée (L_f); pour la transition du pas : les maximums des forces verticales d'impact exercées par la jambe antérieure (F_{vANT}) et postérieure (F_{vPOST}), et le temps d'apparition de la vitesse verticale minimum (V_{vmin}) du centre de masse (CoM) relatif au contact du pied ($T_{V_{vmin}}$); et pour le modèle pendulaire d'échange d'énergie du CoM, la recovery (Rec), ainsi que le travail potentiel (W_p), cinétique (W_k) et externe total (W_{com}), et leur normalisation par la distance (W_p_{norm} , W_k_{norm} , W_{com}_{norm}) ont été analysés. Les variables dépendantes réparties en 3 domaines d'intérêts étaient :

- pour les paramètres spatio-temporels : la moyenne pour une foulée du temps de contact (T_c), du temps d'oscillation (T_o), de la fréquence (Freq), de la longueur de foulée (L_f);
- pour la transition du pas : les maximums des forces verticales d'impact exercées par la jambe antérieure (F_{vANT}) et postérieure (F_{vPOST}), et le temps d'apparition de la vitesse verticale minimale (V_{vmin}) du centre de masse (CoM) relatif au contact du pied ($T_{V_{vmin}}$);
- pour le modèle pendulaire d'échange d'énergie du CoM : la recovery (Rec), ainsi que le travail potentiel (W_p), cinétique (W_k) et externe total (W_{com}), et leur normalisation par la distance (W_p_{norm} , W_k_{norm} , W_{com}_{norm}) ont été analysés.

La normalité des données a été vérifiée à l'aide d'un test de Shapiro-Wilk.

Pour les variables indépendantes (l'âge et le niveau d'activité physique), l'hypothèse de normalité n'est pas respectée au sein des groupes pour l'âge, la masse corporelle, l'indice de masse corporelle (IMC), l'activité physique totale et le sport total. Dans ces cas un test de Kruskal-Wallis suivi d'une comparaison multiple pairée entre groupes avec le test de Dunn et la correction de Bonferroni ont été réalisés.

Pour l'âge, deux variables ne respectaient pas l'hypothèse de normalité ($p < 0.05$) : la force verticale antérieure maximale (F_{VANT}) ($p = 0.01$) pour les sujets jeunes adultes, et le $Wcom_norm$ ($p = 0.021$) pour les sujets adultes plus âgés.

Pour les groupes répartis selon le niveau d'activité physique, une variable ne respectait pas l'hypothèse de normalité ($p < 0.05$) : la force verticale antérieure maximale (F_{VANT}) ($p = 0.048$) pour les sujets du groupe jeunes adultes plus actifs physiquement, et (F_{VANT}) ($p = 0.019$) pour les sujets du groupe adultes plus âgés plus actifs physiquement.

Pour les variables distribuées normalement, un modèle linéaire mixte a été choisi afin d'analyser les variables dépendantes en fonction des groupes d'âge et d'activité physique avec les groupes et les participants respectivement analysés en effet fixe et en effet aléatoire. En outre, une comparaison multiple pairée des groupes a été réalisée avec correction de Bonferroni. Pour toutes les analyses, le seuil de significativité a été fixé à 95 % ($p \leq 0,05$).

III. Résultats

Tableau 1. Caractéristiques des participants selon les groupes

Tableau 1. Caractéristiques des participants selon les groupes				
Variables indépendantes	Jeunes Adultes moins actifs (YA _{-a}) n=16	Jeunes Adultes plus actifs (YA _{+a}) n=15	Adultes plus âgés moins actifs (OA _{-a}) n=14	Adultes plus âgés plus actifs (OA _{+a}) n=14
Moyenne ± écart-type				
Médiane [écart interquartile]				
(Maximum - étendue)				
Age en (ans)	26.46 ± 3.77 25.08 [4.51] (35 - 12.55)	25.33 ± 3.03 24.48 [2.74] (32.05 - 11.22)	72.97 ± 5.38 73.53 [7.94] (82.28 - 17.11)	68.54 ± 2.59 67.54 [4.30] (73.88 - 8.38)
Taille en (m)	1.788 ± 0.087 1.778 [0.11] (1.93 - 0.33)	1.794 ± 0.089 1.800 [0.12] (1.95 - 0.35)	1.697 ± 0.098 1.690 [0.143] (1.89 - 0.33)	1.741 ± 0.094 1.750 [0.12] (1.88 - 0.35)
Masse en (kg)	75.23 ± 11.93 76.75 [14.64] (92.35 - 38.89)	73.36 ± 9.05 75.97 [8.77] (85.32 - 36.21)	75.2 ± 16.42 72.45 [9.53] (122.8 - 66.33)	78.78 ± 14.57 76.95 [16.85] (108.92 - 51.1)
Indice de masse corporelle (IMC) en (kg/m²)	23.759 ± 4.951 23.481 [5.790] (33.363 - 16.611)	22.785 ± 2.356 23.448 [3.047] (26.712 - 9.719)	25.937 ± 3.882 24.862 [3.708] (36.669 - 14.287)	25.905 ± 3.581 26.039 [5.391] (32.583 - 11.626)
Activité physique totale en (MET-minute.semaine⁻¹)	1265 ± 965 1080 [1935] (2940 - 2740)	5392 ± 1471 5340 [2560] (8280 - 5040)	1474 ± 860 1395 [1575] (2640 - 2600)	6481 ± 4847 4500 [4505] (20220 - 17340)
Sport total par semaine en (minute.semaine⁻¹)	82 ± 158.3 3.8 [90] (600 - 600)	529.5 ± 291.4 480 [532.5] (900 - 840)	223 ± 143 180 [136.9] (540 - 540)	406.8 ± 170.7 420 [222.5] (750 - 690)

Notes : IMC= indice de masse corporelle, MET= Metabolic equivalent of task ou équivalent métabolique d'une tâche

Les caractéristiques des participants, reportées dans le tableau 1, sont similaires dans tous les groupes pour leur masse ($H_{(3)}=1.387, p=0.709$), et leur indice de masse corporelle (IMC) ($H_{(3)}=7.676, p=0.053$). Pour la taille, les groupes sont similaires, néanmoins une comparaison multiple par paire avec correction de Bonferroni montre une différence statistiquement significative entre les adultes plus âgés moins actifs (OA_{-a}) et les jeunes plus actifs (YA_{+a}) ($F_{3,55}=3.557, p=0.02, p_{bonf}=0.037$). L'âge ($H_{(3)}=44.721, p<0.001$) est différent parmi les groupes, cependant une comparaison multiple avec le test de Dunn et la correction de Bonferroni n'indique pas de différences entre les groupes de même âge (YA_{-a} - YA_{+a}, $p=0.653$ et OA_{-a} - OA_{+a}, $p=0.291$). L'âge ($H_{(3)}=44.721, p<0.001$) est différent parmi les groupes, cependant une comparaison multiple avec le test de Dunn et la correction de Bonferroni n'indique pas de différence entre les groupes de même âge (YA_{-a} - YA_{+a}, $p=0.653$ et OA_{-a} - OA_{+a}, $p=0.291$). De même pour l'activité physique totale ($H_{(3)}=43.482, p<0.001$) où les groupes de même niveau ne sont pas différents (YA_{-a} - OA_{-a}, $p=0.749, U=96.5, p=0.525$ et YA_{+a} - OA_{+a}, $p=0.795, U=93.5, p=0.621$). Une différence s'observe dans le sport total par semaine ($H_{(3)}=27.881, p<0.001$), le groupe YA_{-a} est différent des YA_{+a} et OA_{+a} ($p<0.001$).

L'ensemble des statistiques des variables dépendantes (T_c , T_o , Freq, Lf, F_{VANT} , F_{VPOST} , $T_{V_{min}}$, Wp_{norm} , Wk_{norm} , $Wcom_{norm}$, Rec) est reporté dans le tableau 2 (Voir Annexe E) et le tableau 3 (Voir Annexe F). Les valeurs des différences statistiquement significatives entre les groupes et du « d de Cohen » sont reportées dans le tableau 4 (Voir Annexe G).

3.1 Paramètres spatio-temporels

Figure 2. Paramètres spatio-temporels

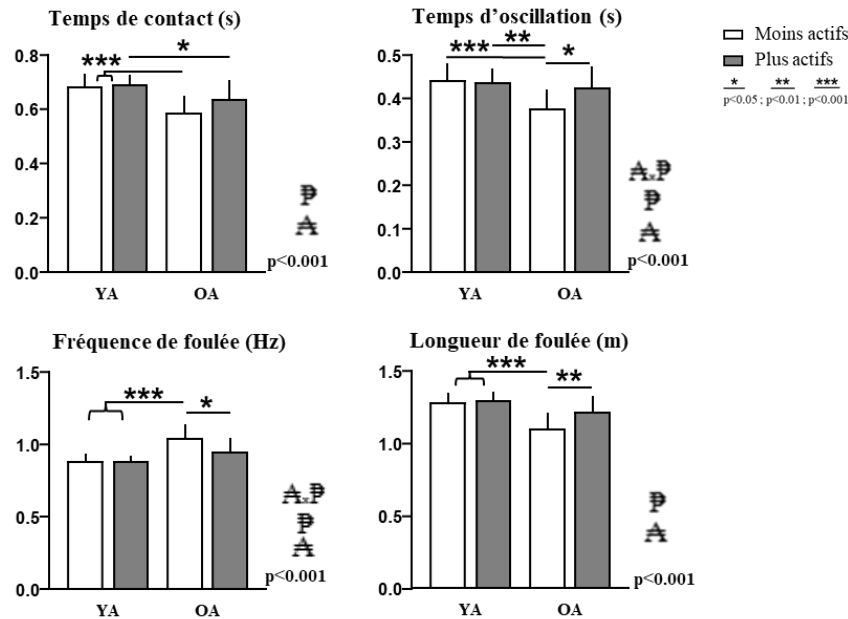


Figure 3. Paramètres spatio-temporels. Le graphique supérieur montre la durée moyenne en secondes (s) des phases de contact (à gauche) et d'oscillation (à droite) d'une jambe durant un cycle de marche. La partie inférieure représente la fréquence (à gauche) et la longueur (à droite) moyennes d'une foulée (2 pas), respectivement en Hertz (Hz) et en mètre (m). (Les barres correspondent aux valeurs moyennes pour tous les sujets et la ligne verticale à 1 écart-type. La p-valeur du test de type III de l'effet fixe est indiquée pour chaque variable. Le niveau de significativité est fixé à $p < 0.05$. Les astérisques (* : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; *** : $p < 0,001$) indiquent le niveau de différence statistiquement significative entre les groupes et les symboles A et P indiquent respectivement un effet significatif de l'âge et de l'activité physique.)

Les paramètres spatio-temporels illustrés dans la figure 2, montrent une différence statistiquement significative entre les groupes. Un effet de l'âge et du niveau d'activité physique est constaté pour toutes les variables et leur interaction, pour le temps d'oscillation et la fréquence de foulée. (Voir Annexe F)

Une différence statistiquement significative est observée pour le temps de contact (T_c) ($F_{3,55}=11.883$, $p < 0.001$) entre les groupes YA et OA_{-a} ($p < 0.001$) ainsi qu'entre les groupes OA_{+a} et YA_{+a} ($p = 0.045$). Le temps d'oscillation (T_o) ($F_{3,55}=7.575$, $p < 0.001$) est significativement différent entre le groupe OA_{-a} et les autres groupes OA_{+a} ($p = 0.022$), YA_{+a} ($p = 0.002$) et YA_{-a} ($p < 0.001$).

La fréquence de foulée (Freq) ($F_{3,55}=13.946, p<0.001$) est significativement différente entre le groupe OA_{-a} et les autres groupes OA_{+a} ($p=0.01$) et YA ($p<0.001$).

Une différence statistiquement significative est aussi observée pour la longueur de foulée (Lf) ($F_{3,55}=15.009, p<0.001$) entre le groupe OA_{-a} et OA_{+a} ($p=0.006$) ainsi qu'avec les groupes YA ($p<0.001$). Aucune différence statistiquement significative est observée entre les groupes YA_{-a} et YA_{+a}.

3.2 Transition du pas

Figure 3. Transition du pas

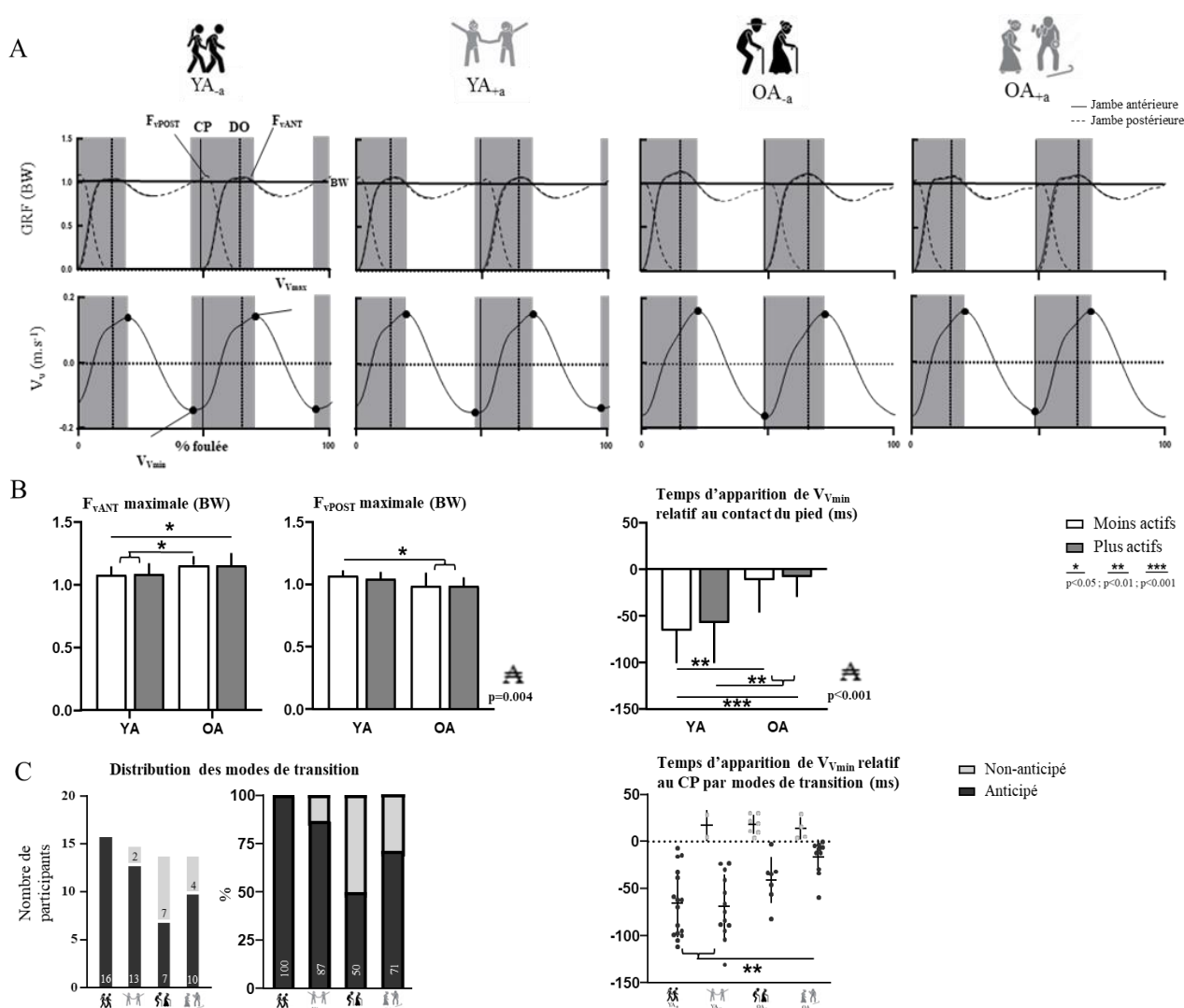


Figure 3. Transition du pas. (A) Rangée supérieure : Courbe moyenne de l'ensemble des participants pour chaque groupe, de la composante verticale de la force de réaction du sol (GRF, exprimé en poids corporel ou bodyweight (BW) appliqué sur les membres inférieurs (trace continue : Jambe antérieure ; trace pointillée : jambe postérieure) en abscisse % foulée pour 2 pas = 1 foulée. Les lignes verticales indiquent le temps de double contact (DC) entre le contact du pied (CP : ligne pleine) et le décollage des orteils (DO : Ligne pointillée). Rangée inférieure : Courbe moyenne de la vitesse verticale (V_v) du centre de masse (CoM), V_{Vmin} et V_{Vmax} correspondent respectivement à la V_v minimale et maximale du CoM. La classification selon la transition du pas se base sur le moment d'apparition relatif au FC, la zone grise représente la période entre V_{Vmin} et V_{Vmax} (B) À gauche : Moyennes de la force d'impact verticale normalisée par le poids corporel en bodyweight (BW) sur la jambe antérieure (F_{VANT}) et sur la jambe postérieure (F_{VPOST}) pendant la transition du pas. À droite : Temps moyen d'apparition de la vitesse verticale minimale relatif au contact du pied ($T_{V_{Vmin}}$) en millisecondes (ms). Une valeur négative indique une transition anticipée. (C) À gauche : Répartition des modes de transition anticipés et non-anticipés parmi les groupes en nombre de participants et en pourcentage (%). À droite : Répartition des temps moyen d'apparition de la vitesse verticale minimale relatif au contact du pied ($T_{V_{Vmin}}$) en millisecondes (ms) pour chaque participant. Le trait horizontal correspond à la moyenne de chaque groupe en fonction du mode de transition. (Les barres correspondent aux valeurs moyennes pour tous les sujets et la ligne verticale à 1 écart-type. La p-valeur du test de type III de l'effet fixe est indiquée pour chaque variable. Le niveau de significativité est fixé à $p<0.05$. Les astérisques (* : $p<0,05$; ** : $p<0,01$; *** : $p<0,001$) indiquent le niveau de différence statistiquement significative entre les groupes et les symboles A et P indiquent respectivement un effet significatif de l'âge et de l'activité physique.)

Comme le représente la figure 3, les groupes de même âge sont similaires entre eux pour toutes les variables de transition du pas. Un effet de l'âge est mis en évidence pour la force verticale postérieure maximale ($F_{1,55}=13.750$, $p<0.001$) et pour le temps d'apparition de V_{Vmin} relatif au contact du pied ($F_{1,55}=32.350$, $p<0.001$).

Des différences statistiquement significatives sont observées pour la force verticale antérieure maximale (F_{VANT}) ($H_{(3)}=10.103$, $p=0.018$) entre le groupe OA_{-a} et les groupes YA_{-a} ($p=0.012$) et YA_{+a} ($p=0.028$) ainsi qu'entre les OA_{+a} et les YA_{-a} ($p=0.024$).

De même pour la force verticale postérieure maximale (F_{VPOST}) ($F_{3,55}=4.963$, $p=0.004$) des différences statistiquement significatives sont mises en évidence entre le groupe YA_{-a} et les groupes OA_{-a} ($p=0.017$) et OA_{+a} ($p=0.015$).

Le temps d'apparition de V_{Vmin} relatif au contact du pied (T_{Vmin}) ($F_{3,55}=10.994$, $p<0.001$) est significativement différent entre le groupe OA_{-a} et les groupes YA_{-a} ($p=0.001$) et YA_{+a} ($p=0.005$) ainsi qu'entre le groupe OA_{+a} et les groupes YA_{-a} ($p<0.001$) et YA_{+a} ($p=0.002$).

Dans la répartition des modes de transition du pas au sein des groupes, une transition anticipée est observée pour 100% des YA_{-a} , 87% des YA_{+a} , 71% des OA_{+a} et 50% des OA_{-a} et le reste des participants (13% des YA_{+a} , 29% des OA_{+a} et 50% des OA_{-a}) a utilisé une transition non-anticipée. Le test khi-deux de Pearson indique une différence entre les proportions des groupes ($\chi^2_{(3)}=11.905$, $p=0.008$; Phi & V de Cramer = 0.449, $p=0.008$).

Après la division des groupes selon le mode de transition, pour les participants présentant une transition anticipée ($F_{3,42}=7.25$, $p<0.001$), une différence est observée entre les groupes OA_{+a} et les YA_{-a} ($p=0.0012$). Pour la transition non-anticipée, les moyennes des temps d'apparition sont similaires ($F_{2,10}=0.1884$, $p=0.8312$) parmi les groupes YA_{+a} , OA_{-a} et OA_{+a} .

3.3 Mécanisme pendulaire de la marche

Figure 4. Mécanisme pendulaire de la marche

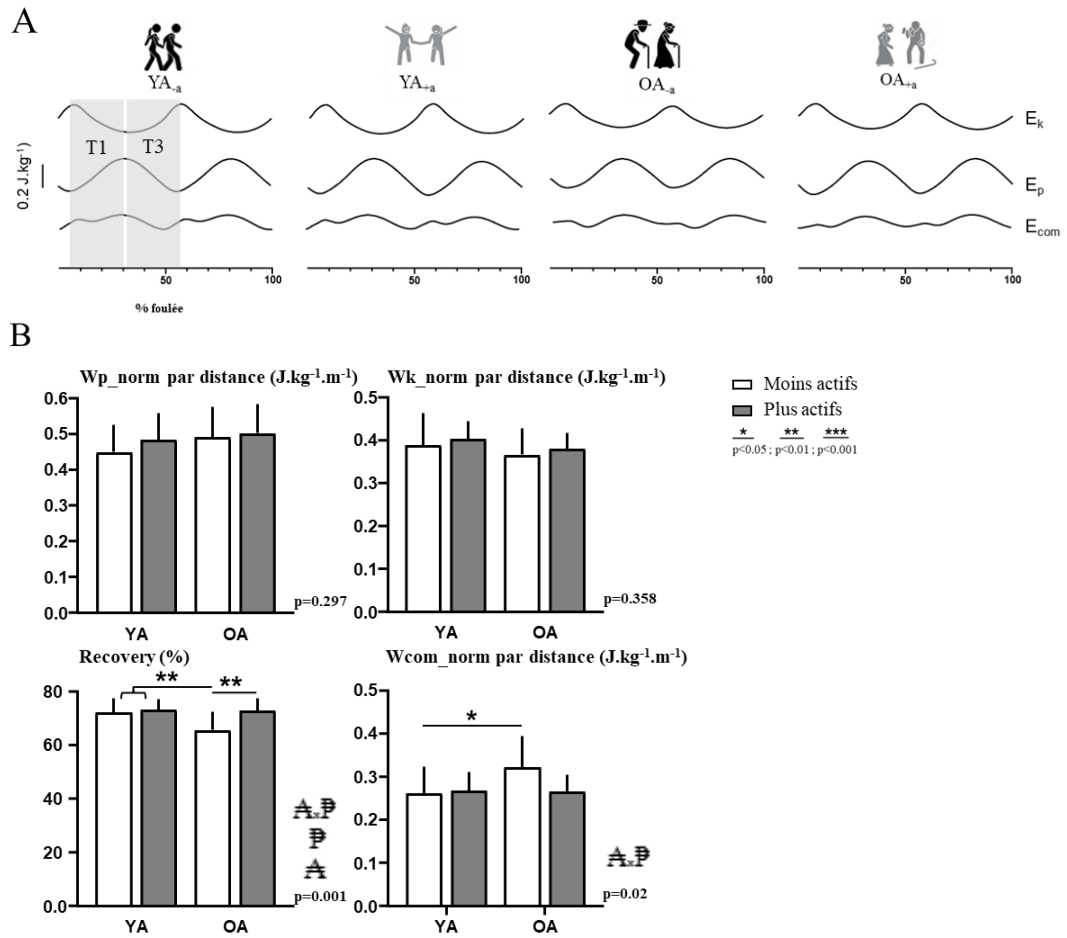


Figure 4. Mécanisme pendulaire de la marche (A) Tracé moyen de l'ensemble des participants pour chaque groupe représentant une foulée. Les tracés présentés sont les tracés moyens des courbes moyennes pour tous les participants du groupe (moyenne d'ensemble). Tracés de l'énergie cinétique (E_k), potentielle (E_p) et totale (E_{com}) du CoM pendant une foulée à 1.11 m.s⁻¹. (B) Les graphiques supérieurs montrent la moyenne du travail potentiel (Wp_norm), cinétique (Wk_norm) et externe total positif ($Wcom_norm$), normalisés par la distance et la masse corporelle exprimé en Joule.kilogramme⁻¹.m⁻¹ ($J.kg^{-1}.m^{-1}$) produit lors d'une foulée. Le graphique inférieur correspond à la moyenne de la recovery durant la foulée variant de 0% quand les courbes E_k et E_p sont en phase à 100% quand elles sont en opposition ce qui signifie que l'augmentation d'une courbe équivaut à la diminution de l'autre aboutissant à un transfert d'énergies efficient et une économie de travail externe total positif ($Wcom$) à fournir. (Les barres correspondent aux valeurs moyennes pour tous les sujets et la ligne verticale à 1 écart-type. (La p-valeur du test de type III de l'effet fixe est indiquée pour chaque variable. Le niveau de significativité est fixé à $p < 0.05$. Les astérisques (* : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; *** : $p < 0,001$) indiquent le niveau de différence statistiquement significative entre les groupes et les symboles A et P indiquent respectivement un effet significatif de l'âge et de l'activité physique.

Comme illustré dans la figure 4 pour les paramètres d'intérêts du modèle du mécanisme pendulaire lors de la marche, les groupes sont similaires pour le travail potentiel normalisé (Wp_norm) ($F_{3,55}=1.261$, $p=0.297$) et cinétique normalisé (Wk_norm) ($F_{3,55}=1.097$, $p=0.358$). Aucun effet de l'âge, du niveau d'activité physique ou de leur interaction n'est constaté.

Une différence statistiquement significative est observée au niveau du travail externe total normalisé du CoM ($Wcom_norm$) ($F_{3,55}=3.574, p=0.02$) entre les OA_{-a} et les YA_{-a} ($p=0.033$). Un effet de l'interaction entre l'âge et le niveau d'activité physique est constaté ($F_{1,55}=6.073, p=0.017$).

Pour la recovery (Rec) ($F_{3,55}=6.674, p=0.001$), des différences statistiquement significatives sont mises en évidence entre le groupe OA_{-a} et les autres groupes OA_{+a} ($p=0.003$), YA_{-a} ($p=0.006$) et YA_{+a} ($p=0.002$). Des effets de l'âge ($F_{1,55}=6.289, p=0.015$), du niveau d'activité physique ($F_{1,55}=7.543, p=0.008$) et de leur interaction ($F_{1,55}=6.578, p=0.013$) sont mis en évidence.

IV. Discussion

L'objectif de ce travail consistait à observer les modifications présentes lors d'une marche à 4 km.h^{-1} parmi des jeunes adultes (20 à 35ans) et des sujets âgés (plus de 65 ans) chez des sujets plus actifs ou moins actifs physiquement, afin d'observer une potentielle atténuation de l'effet du vieillissement en fonction du niveau d'activité physique. Nous émettons l'hypothèse que nous observerons des modifications des paramètres spatio-temporels et de transition du pas ainsi qu'au niveau du modèle pendulaire de la marche entre les groupes d'âge, et que l'altération sera moindre chez les individus plus actifs physiquement que chez leurs homologues moins actifs.

Comme supposé dans la 1^{ère} hypothèse, les résultats obtenus montrent des différences entre le groupe OA_{-a} et les 2 groupes YA pour l'intégralité des paramètres spatio-temporels (T_c , T_o , Freq, Lf), pour la force verticale antérieure maximale (F_{vANT}), le temps d'apparition de V_{Vmin} relatif au contact du pied (T_{Vmin}) et la recovery (Rec). Le groupe OA_{+a} et les 2 groupes YA sont différents pour le temps d'apparition de V_{Vmin} relatif au contact du pied (T_{Vmin}). Des différences sont observées entre les groupes OA_{-a} et YA_{-a} pour la force verticale postérieure maximale (F_{vPOST}) et le travail externe total du CoM normalisé (W_{com_norm}) ; entre les groupes OA_{+a} et YA_{+a} pour le temps de contact (T_c) ainsi que YA_{-a} pour les forces verticales maximales antérieures (F_{vANT}) et postérieures (F_{vPOST}). Ces observations concordent avec diverses études reprises dans la revue de littérature de Aboutorabi A. et al. (2015) qui rapportent également une augmentation de la fréquence de pas et une diminution de sa longueur (DeVita & Hortobagyi, 2000; Hollman et al., 2011; Ko et al., 2009; Stolze, 2000) chez les sujets âgés (plus de 65 ans). Des valeurs références, publiées par Beauchet et al. en 2017 et évaluées grâce au système GAITRite[®] (tapis de 4 à 9 mètres avec une surface intégrant des capteurs de pression), indiquent une diminution au fil des ans des paramètres spatio-temporels tels que le temps d'oscillation (T_o) et la longueur de foulée (Beauchet et al., 2017).

En 2018, la revue systématique, de Herssens et al., identifie une diminution des paramètres spatiaux et spatio-temporels tels que la vitesse, la cadence, la longueur de foulée et une augmentation des paramètres temporels (Herssens et al., 2018). Ces adaptations caractéristiques d'un pattern de marche conservateur et prudent seraient présentes chez les sujets âgés (plus de 65ans) (Menz, 2003) pour tenter d'augmenter leur stabilité et réduire leur risque de chutes lors de la marche (Aboutorabi et al., 2015). Par ailleurs, la longueur et la cadence de foulée varient en fonction des conditions (Tapis roulant, en intérieur et en extérieur) de marche (Schmitt et al., 2021) et semble être des facteurs modifiables par la volonté (Jerome et al., 2015). Différentes revues systématiques soulignent l'amélioration de ces paramètres ou des performances à la marche grâce à des guides sonores rythmiques chez des populations saines (Ghai et al., 2018) et pathologiques (L. R. Nascimento et al., 2015; Wang et al., 2022).

Concernant la seconde hypothèse, les résultats de la comparaison entre les groupes d'âge similaires et de niveaux différents d'activité physique mettent en évidence des différences entre les groupes OA_{-a} et OA_{+a} au niveau des paramètres spatio-temporels pour le temps d'oscillation (To), la fréquence (Freq) et la longueur de foulée (Lf), ainsi qu'au niveau de la recovery (Rec). Les autres paramètres étudiés sont similaires. Les groupes YA_{-a} et YA_{+a} ont des résultats semblables pour l'ensemble des paramètres étudiés.

En 2012, Boyer et al. se sont intéressés au rôle de l'activité physique dans ces modifications de la marche liées à l'âge. Ils rapportent une longueur de pas diminuée et une cadence augmentée pour conserver une vitesse similaire entre les sujets âgés (plus de 65 ans) et les jeunes adultes (18 à 40 ans). Néanmoins, leurs résultats indiquent qu'un niveau élevé d'activité physique, en particulier de marche (>7500 pas/jour) ou d'activités à faible impact tels que le vélo et la natation, permettrait d'atténuer les modifications observées (Boyer et al., 2012).

En outre, Egerton et al. (2017) soulignent que des pas plus longs sont positivement associés avec plus d'activité physique. En revanche, pour la cadence, une association négative est observée.

Les sujets ayant une activité physique moindre ont une fréquence de pas plus élevée (Egerton et al., 2017).

Récemment, Rekant et al. (2023) ont investigué l'association entre les paramètres de marche et la quantité d'activité physique non-structurée chez des sujets âgés (plus de 65 ans) en surpoids ($26 < \text{IMC} < 30 \text{ kg/m}^2$) et obèses ($\text{IMC} > 30 \text{ kg/m}^2$). Leurs résultats révèlent l'influence négative d'un indice de masse corporelle (IMC) élevé sur les paramètres spatio-temporels et de symétrie de la marche. Parallèlement, le niveau d'activité physique diminuerait ces modifications car elles s'avèrent d'ampleur moindre chez les participants plus actifs physiquement. Indépendamment de l'âge, les participants moins actifs avec un IMC élevé présentaient une moins bonne qualité de déplacement (Rekant et al., 2023).

Malgré une prévalence non-négligeable (11.9% en 2010) d'inactivité physique chez les personnes âgées de plus de 55 ans en Belgique (Gomes et al., 2017), une pratique régulière d'activités physiques de faible (<3 METs) intensité jusqu'à des intensités modérées (3-6 METs) ou plus vigoureuses (>6METs) (Ainsworth et al., 2000; Pate et al., 1995) permettrait de réduire les risques de pathologies majeures, d'obésité, de chutes (Bangsbo et al., 2019; Chodzko-Zajko et al., 2009; McPhee et al., 2016) ainsi que de réduire le déclin des fonctions cognitives (Domingos et al., 2021) et musculaires (Leslie et al., 2023). De plus, des effets bénéfiques sont rapportés pour le maintien des capacités fonctionnelles (Leslie et al., 2023; Paterson et al., 2007; Paterson & Warburton, 2010) et de l'indépendance dans la vie quotidienne (Roberts et al., 2017).

Concernant le modèle pendulaire de la marche et les échanges d'énergie du centre de masse (CoM), une étude de Dewolf et al. (2022) montre un travail externe total (Wcom) plus important, en lien avec une recovery (Rec) plus faible, dans leur groupe de sujets âgés présentant un mode de transition non-anticipé. La proportion plus importante (50%) de participants

présentant un mode transition non-anticipé dans le groupe OA_a pourrait expliquer la différence observée au niveau de la recovery (Rec).

Les auteurs suggèrent l'implication du mode de transition du pas dans l'économie d'énergie pendulaire. Lors de la transition non-anticipée, une diminution de l'économie d'énergie pendulaire est constatée, causée par une plus grande transformation d'énergie lors de la phase de diminution de l'Ep et d'augmentation de l'Ek (T3) comparé à la phase opposée (T1) (Voir figure 4.A). Lors de la transition non-anticipée, une diminution de l'économie d'énergie pendulaire est constatée, causée par une plus grande transformation d'énergie lors de la phase de diminution de l'Ep et d'augmentation de l'Ek (T3) comparée à la phase opposée (T1) (Voir figure 4.A). Cela pourrait être expliqué par l'incapacité de la jambe postérieure à produire la poussée nécessaire pour accélérer vers le haut le CoM avant le double contact. La réduction de la recovery est provoquée par l'accélération du CoM vers le haut et l'avant produite par la force de réaction du sol sur la jambe antérieure (Dewolf et al., 2022).

Dans cet ordre d'idées, la pratique d'une activité physique plus importante semblerait limiter cette augmentation du travail externe total normalisé (W_{com_norm}) chez les personnes âgées de plus de 65 ans (Voir figure 4.B). Outre les nombreux facteurs impliqués dans le coût métabolique de la marche (Aboutorabi et al., 2015; Boyer et al., 2023; Das Gupta et al., 2019; Pieper et al., 2021), le travail mécanique y contribue également (Donelan et al., 2002; Peyré-Tartaruga et al., 2021). Chez les personnes âgées, la diminution de la vitesse de marche et la réduction de mobilité seraient influencées par l'augmentation du coût énergétique de la marche (Schrack et al., 2016). Ces modifications impactent la santé (Musich et al., 2018), la qualité de vie (Steckhan et al., 2022) et la survie (Studenski et al., 2011) des personnes âgées.

Les résultats des paramètres de transition du pas indiquent un effet de l'âge. Certaines études sur la transition du pas mettent en évidence des pistes de réflexion afin de comprendre les différences observées. Une fréquence de foulée plus élevée, une longueur de foulée plus courte et un temps de

transition plus court associés à une faiblesse ou sous-utilisation des fléchisseurs plantaires (Boyer et al., 2023; Buddhadev & Martin, 2016) causeraient une diminution de la force poussée verticale chez les sujets âgés (Meurisse et al., 2019a). La force maximale plus importante de la jambe antérieure, pour compenser la diminution de contribution de la jambe postérieure dans le support vertical dans les groupes OA, a également été observée chez des populations similaires (Dewolf et al., 2022; Meurisse et al., 2019a, 2019b). Ces adaptations impliqueraient l'apparition d'une transition plus tardive dans le cycle du pas et proche du double contact (anticipé), voire après ce dernier (non-anticipé) (Nunez-Lisboa, Bastien, et al., 2023). Différentes modifications liées au déclin de la marche lors du vieillissement, telles qu'un mauvais équilibre statique, un travail mécanique supérieur ou encore des changements de coordination des membres et d'organisation des efférences spinales motrices, sembleraient associées à cette redirection tardive du centre de masse (CoM) (Dewolf et al., 2022). Certaines études observent un lien entre la topographie fonctionnelle de la moelle épinière et le contrôle de la direction du CoM (Cappellini et al., 2010; Dewolf et al., 2020). Parallèlement, les modifications neuromusculaires (Gonzalez-Freire et al., 2014; Hepple & Rice, 2016; Hunter et al., 2016), et en particulier les caractéristiques d'excitabilité des motoneurones diminuées avec l'âge (Hassan et al., 2021; Orssatto et al., 2021), ainsi que les changements d'activités au niveau du groupe de motoneurones sacraux (Dewolf et al., 2019), contribueraient au changement de stratégie de transition du pas (Dewolf et al., 2021). Une pratique plus importante d'activité physique ne semble pas impacter la stratégie de transition du pas. Afin d'atténuer les conséquences sur la marche des changements neurodégénératifs liés au vieillissement, l'utilisation de biofeedback s'avère utile et efficace (Alhasan et al., 2017; Browne & Franz, 2019; Tate & Milner, 2010). Par ailleurs, la littérature met en évidence l'opportunité des techniques de neuromodulation spinale plus locales telles que la « transcutaneous spinal direct current stimulation » (tsDCS) pour améliorer l'activité spinale, et par conséquent le contrôle de la marche chez des personnes âgées de plus de 65 ans (Clark et al., 2022; Nunez-Lisboa, Valero-Breton, et al., 2023).

En résumé, les résultats suggéreraient des différences liées à l'âge, principalement sur l'intégralité des paramètres spatio-temporels et de transition du pas, ainsi qu'au niveau de la recovery. Néanmoins, une pratique plus importante d'activité physique semblerait atténuer les modifications du temps d'oscillation (To), de la fréquence (Freq), de la longueur de foulée (Lf) et de la recovery (Rec). En concordance avec la littérature (Boyer et al., 2012; Ciprandi et al., 2017; Egerton et al., 2017; M. D. M. Nascimento et al., 2022; Rekant et al., 2023; Shafizadeh et al., 2023), les résultats suggéreraient également une atténuation, grâce au niveau d'activité physique, des modifications liées à l'âge sur différents paramètres de la marche (Boyer et al., 2017, 2023; Herssens et al., 2018).

Par ailleurs, d'autres études, incluant des paramètres neuro-musculaires (Electromyographie, Test de Force) et cinématiques (Analyse du mouvement), sont nécessaires pour essayer de comprendre les mécanismes sous-jacents à ces modifications liées à l'âge et l'impact précis de l'activité physique, ainsi que d'autres approches (biofeedback, neuromodulation) dans leur atténuation. Notamment, via la détermination d'un niveau minimal d'activité physique auquel des effets positifs sont observés.

V. Limitations

Certaines limites sont à mentionner malgré nos bonnes intentions et la rigueur du protocole expérimental.

Le recrutement de participants inactifs physiquement fut très complexe, autant pour les jeunes adultes que pour leurs aînés. Cela nous a amené à classer les participants en moins ou plus actifs selon la médiane des groupes afin d'obtenir 4 échantillons de taille similaire.

Les participants âgés (plus de 65 ans) étaient en bonne santé et sans pathologies influençant leur marche. Ils se déplaçaient sans difficulté et ne présentaient pas d'antécédents ou de risques de chutes. Dès lors, cet échantillon n'est pas représentatif de la population âgée à risques ou vivant avec des troubles à la marche.

Cependant, l'accès au laboratoire et la participation aux études s'avère complexe pour cette population, qui représente une large proportion au sein de la communauté, qui mériterait une plus grande inclusion dans la recherche scientifique (Boyer et al., 2023).

La marche sur tapis roulant, inhabituelle pour la majorité des participants, peut s'avérer déstabilisante et requiert une capacité d'adaptation importante. En outre, les paramètres de marche tels que la vitesse, le temps de double contact, la longueur de foulée et la cadence, varient en fonction de la condition environnementale de marche (Tapis roulant, Marche en intérieur ou en extérieur). Les performances en laboratoire sur tapis roulant ne représentent pas les performances dans d'autres conditions peu importe l'âge (Row Lazzarini & Kataras, 2016; Schmitt et al., 2021). Par exemple, la cadence varie durant une journée en fonction des activités et définir une cadence habituelle devient dès lors complexe (Tudor-Locke & Rowe, 2012). Ici, la marche sur tapis roulant permettait de standardiser la vitesse, d'assurer la sécurité des participants grâce au port d'un harnais de sécurité et d'utiliser les caméras pour l'analyse cinématique. Un temps de familiarisation plus long que celui accordé aurait pu être souhaitable pour obtenir une marche plus habituelle chez les participants et en particulier chez les plus âgés (Schellenbach et al., 2010).

Le mode de transition du pas dépend de la vitesse de marche. Les résultats de Meurisse et al. indiquent que les jeunes adultes réalisent une transition non-anticipée à vitesse lente ($<1.11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) et une transition anticipée aux vitesses modérées et élevées ($>1.11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) (Meurisse et al., 2019a). De ce fait, des prises de mesures à différentes vitesses supérieures à $1.11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ permettraient d'avoir une vue plus exhaustive des changements liés à l'âge étant donné qu'ils semblent davantage marqués à des vitesses plus élevées (Dewolf, 2022). D'autant que la vitesse de marche influence également les paramètres spatio-temporels, cinématiques et cinétiques, ainsi que les forces de réaction du sol (Fukuchi et al., 2019).

VI. Conclusion

L'expérience consistait en l'analyse de la marche à 4 km.h^{-1} sur tapis roulant chez des sujets d'âges et de niveaux différents d'activité physique. Il a été mis en évidence des modifications parmi les paramètres spatio-temporels, de transition du pas, ainsi qu'au niveau du modèle pendulaire entre les sujets jeunes et plus âgés, particulièrement dans la transition du pas et les paramètres spatio-temporels. Ces différences étaient atténuées si le sujet était considéré comme plus actif physiquement pour le temps d'oscillation, la fréquence et la longueur de foulée, de même que pour la recovery. Cette étude met en évidence l'intérêt de l'activité physique dans le ralentissement des processus de vieillissement naturel influençant la marche chez des personnes âgées de plus de 65 ans en bonne santé. Une meilleure compréhension de l'impact du vieillissement sur le contrôle neuro-musculaire de la marche serait idéale pour adapter les techniques de prévention et de réhabilitation, afin d'offrir à une population mondiale vieillissante une meilleure qualité de vie et une longévité plus importante.

VII. Annexes

1. Annexe A : Avis du Comité d’Ethique Hospitalo-Facultaire



Comité d’Éthique Hospitalo-Facultaire

Bruxelles, ce 17 janvier 2023

À l’investigateur responsable
Prof. Arthur DEWOLF
FSM
Place Pierre de Coubertin 1/L8.10.01
1348 Louvain-la-Neuve

AVIS FAVORABLE DÉFINITIF

Concernant : 2022/22NOV/439 - N° Enregistrement Belge : B403202200136

N° Protocole : NEUROMECHAGING

Acronyme : n/a

Intitulé : Learn from our elders: understanding and counteracting the impairment of neuromuscular control with aging

Cher Collègue,

Le Comité d’Éthique Hospitalo-Facultaire Saint-Luc - UCL a pris connaissance de l’étude susmentionnée. Nous avons examiné l’ensemble des documents concernant cette étude, y compris les documents modifiés suite aux remarques :

- Document 1, reçu le 16/12/2022
- Protocole expérimental, version 2 daté de 15/12/2022
- Résumé en FR, reçu le 16/12/2022
- Document d’information et de consentement participant, version 2, daté de 15/12/2022
- Annexe - Mini-Mental State Examination, reçu le 16/12/2022
- Annexe - SPPB Test, reçu le 16/12/2022
- Certificat d’assurance Ethica daté du 07 novembre 2022
- CVs datés et signés du PI - co-PI, reçus le 16/12/2022
- Questionnaire Initial ROPD, reçu le 16/12/2022
- Document de réponse aux remarques du CEHF, reçu le 16/12/2022

En tant que comité d’éthique principal désigné par le promoteur (auquel en Belgique), selon les directives de la loi du 87 mai 2004, nous donnons un avis favorable définitif à ce projet.

Nous rappelons à l’investigateur qu’il est personnellement responsable de cette étude et en tant que promoteur qu’il est responsable de la conformité linguistique des formulaires d’information et de consentement.

Aucun participant ne peut être admis dans une expérimentation ou un essai clinique avant que le comité d’éthique (IRB/IEC) n’ait donné un avis écrit favorable au projet.

Aucune modification ni changement au protocole ne peut être mis en route sans l’approbation préalable écrite du comité d’éthique à l’amendement approprié excepté les situations prévues dans les bonnes pratiques cliniques (BPC/GCP).



Comité d’Éthique Hospitalo-Facultaire

Le comité d’éthique principal déclare qu’il procède selon les directives ICHGCP, les lois et règlements applicables, et ses propres procédures écrites.

Le comité d’éthique principal déclare qu’aucun de ses membres ayant une affiliation avec l’étude ou le sponsor n’a voté pour cette étude.

Une liste des membres actuels est jointe en annexe.

Le comité d’éthique principal sera continuellement informé de tous les SUSAR et déviations liés à ce protocole et qui se sont produits en Belgique.

Le comité d’éthique sera également informé du statut de l’étude sur base continue (comme requis par les directives ICHGCP 4.38.1).

Nous vous prions d’agiter, cher Collègue, l’expression de nos sentiments les meilleurs.

de Hemptinne

Mme E. de HEMPTINNE
Membre CEHF

J. M. Galoteaux

Prof. J.-M. GALOTEAUX
Président

2. Annexe B: Checklist guidelines STROBE (2014)

Repris de (Gedda, 2015)

Section	Item	Recommandation	Numéro de page
TITRE & RESUME			
	1	(a) Indiquer dans le titre ou dans le résumé le type d'étude réalisée en termes couramment utilisés. (b) Fournir dans le résumé une information synthétique et objective sur ce qui a été fait et ce qui a été trouvé.	Titre Résumé
INTRODUCTION			
Contexte/justification	2	Expliquer le contexte scientifique et la légitimité de l'étude en question.	1-2-3-4
Objectifs	3	Citer les objectifs spécifiques, y compris toutes les hypothèses a priori.	5
METHODES			
Conception de l'étude	4	Présenter les éléments clés de la conception de l'étude en tout début de document.	6-7
Contexte	5	Décrire le contexte, les lieux et les dates pertinentes, y compris les périodes de recrutement, d'exposition, de suivi et de recueil de données.	6-7
Population	6	(a) Étude de cohorte – Indiquer les critères d'éligibilité, et les sources et méthodes de sélection des sujets. Décrire les méthodes de suivi. (b) Étude de cohorte – Pour les études appariées, indiquer les critères d'appariement et le nombre de sujets exposés et non exposés.	6-7
Variables	7	Définir clairement tous les critères de résultats, les expositions, les facteurs de prédiction, les facteurs de confusion potentiels, et les facteurs d'influence. Indiquer les critères diagnostiques, le cas échéant.	8-9
Source de données/mesures	8	Pour chaque variable d'intérêt, indiquer les sources de données et les détails des méthodes d'évaluation (mesures). Décrire la comparabilité des méthodes d'évaluation s'il y a plus d'un groupe.	8-9
Biais	9	Décrire toutes les mesures prises pour éviter les sources potentielles de biais.	8-9
Taille de l'étude	10	Expliquer comment a été déterminé le nombre de sujets à inclure.	6
Variables quantitatives	11	Expliquer comment les variables quantitatives ont été traitées dans les analyses. Le cas échéant, décrire quels regroupements ont été effectués et pourquoi.	6-7-8
Analyse statistiques	12	(a) Décrire toutes les analyses statistiques, y compris celles utilisées pour contrôler les facteurs de confusion. (b) Décrire toutes les méthodes utilisées pour examiner les sous-groupes et les interactions. (c) Expliquer comment les données manquantes ont été traitées. (d) Étude de cohorte – Le cas échéant, expliquer comment les perdus de vue ont été traités. (e) Décrire toutes les analyses de sensibilité.	9-10

Section	Item	Recommandation	Numéro de page
RESULTATS			
Populations	13	(a) Rappporter le nombre d'individus à chaque étape de l'étude – par exemple : potentiellement éligibles, examinés pour l'éligibilité, confirmés éligibles, inclus dans l'étude, complètement suivis, et analysés. (b) Indiquer les raisons de non-participation à chaque étape. (c) Envisager l'utilisation d'un diagramme de flux.	11
Données descriptives	14	(a) Indiquer les caractéristiques de la population étudiée (par exemple : démographiques, cliniques, sociales) et les informations sur les expositions et les facteurs de confusion potentiels. (b) Indiquer le nombre de sujets inclus avec des données manquantes pour chaque variable d'intérêt. (c) Étude de cohorte – Résumer la période de suivi (par exemple : nombre moyen et total).	11
Données obtenues	15	Étude de cohorte – Rappporter le nombre d'évènements survenus ou les indicateurs mesurés au cours du temps	
Principaux résultats	16	(a) Indiquer les estimations non ajustées et, le cas échéant, les estimations après ajustement sur les facteurs de confusion avec leur précision (par exemple : intervalle de confiance de 95 %). Expliciter quels facteurs de confusion ont été pris en compte et pourquoi ils ont été inclus. (b) Indiquer les valeurs bornes des intervalles lorsque les variables continues ont été catégorisées. (c) Selon les situations, traduire les estimations de risque relatif en risque absolu sur une période de temps (cliniquement) interprétable.	11-12-13-14-15-16-31-32-33
Autres analyses	17	Mentionner les autres analyses réalisées – par exemple : analyses de sous-groupes, recherche d'interactions, et analyses de sensibilité.	11-12-13-14-15-16-31-32-33
DISCUSSION			
Résultats clés	18	Résumer les principaux résultats en se référant aux objectifs de l'étude.	17-18-24
Limitations	19	Discuter les limites de l'étude, en tenant compte des sources de biais potentiels ou d'imprécisions. Discuter du sens et de l'importance de tout biais potentiel.	22-23
Interprétation	20	Donner une interprétation générale prudente des résultats compte tenu des objectifs, des limites de l'étude, de la multiplicité des analyses, des résultats d'études similaires, et de tout autre élément pertinent.	17-18-19-20-21-22
« Généralisabilité »	21	Discuter la « généralisabilité » (validité externe) des résultats de l'étude.	22-23-24
AUTRE INFORMATION			
Financement	22	Présenter les éléments clés de la conception de l'étude en tout début de document.	

3. Annexe C : Critères de sélection des participants

Critères de sélection	
Critères d'inclusion	<ul style="list-style-type: none">✓ Score au Mini-Mental Status Examination ≥ 24✓ Capacité de marcher (Short Physical Performance Battery (SPPB) entre 3 et 9)✓ Adultes plus âgés (+ de 65 ans)✓ Jeunes adultes (entre 20 et 35 ans)
Critères d'exclusion	<ul style="list-style-type: none">* Maladie de Parkinson ou autres troubles neurologiques* Accident vasculaire cérébral* Troubles métaboliques : Diabète ; maladie rénale chronique à un stade avancé, insuffisance hépatique grave* Troubles cardiaques et chirurgie cardiaque majeure récente* Médication tels que neuromodulateurs et les dérivés nitrés* Aucune blessure au cours des 6 mois précédant la prise de mesures

4. Annexe D : Version 2.0 du GPAQ

Source : World Health Organization (2021), *Global physical activity questionnaire (GPAQ) Analysis guide*, Surveillance and Population-Based Prevention of Noncommunicable Diseases Department World Health Organization 20 Avenue Appia, 1211 Geneva 27, Switzerland. En ligne : [Microsoft Word - GPAQ Analysis Guide.doc \(who.int\)](#) vf : [Microsoft Word - GPAQ Analysis Guide_FR.doc \(onaps.fr\)](#) (Consulté le 29-04-2024)

Activité physique			
<p>Je vais maintenant vous poser quelques questions sur le temps que vous consacrez à différents types d'activité physique lors d'une semaine typique. Veuillez répondre à ces questions même si vous ne vous considérez pas comme quelqu'un d'actif.</p> <p>Pensez tout d'abord au temps que vous y consacrez au travail, qu'il s'agisse d'un travail rémunéré ou non, de tâches ménagères, de cueillir ou récolter des aliments, de pêcher ou chasser, de chercher un emploi. [Ajouter d'autres exemples si nécessaire]. Dans les questions suivantes, les activités physiques de forte intensité sont des activités nécessitant un effort physique important et causant une augmentation conséquente de la respiration ou du rythme cardiaque, et les activités physiques d'intensité modérée sont des activités qui demandent un effort physique modéré et causant une petite augmentation de la respiration ou du rythme cardiaque.</p>			
Question	Réponse	Code	
Activités au travail			
1	<p>Est-ce que votre travail implique des activités physiques de forte intensité qui nécessitent une augmentation conséquente de la respiration ou du rythme cardiaque, comme [soulever des charges lourdes, travailler sur un chantier, effectuer du travail de maçonnerie] pendant au moins 10 minutes d'affilée ?</p> <p>[INSÉRER DES EXEMPLES LOCAUX ET MONTRER LES CARTES]</p>	<p>Oui 1</p> <p>Non 2 Si Non, aller à P4</p>	P1
2	Habituellement, combien de jours par semaine effectuez-vous des activités physiques de forte intensité dans le cadre de votre travail ?	Nombre de jours <input type="text"/>	P2
3	Lors d'une journée habituelle durant laquelle vous effectuez des activités physiques de forte intensité, combien de temps consacrez-vous à ces activités ?	Heures : minutes <input type="text"/> : <input type="text"/> hrs mins	P3 (a-b)
4	Est-ce que votre travail implique des activités physiques d'intensité modérée, comme une marche rapide ou [soulever une charge légère] durant au moins 10 minutes d'affilée ?	<p>Oui 1</p> <p>Non 2 Si Non, aller à P7</p>	P4
5	Habituellement, combien de jours par semaine effectuez-vous des activités physiques d'intensité modérée dans le cadre de votre travail ?	Nombre de jours <input type="text"/>	P5
6	Lors d'une journée habituelle durant laquelle vous effectuez des activités physiques d'intensité modérée, combien de temps consacrez-vous à ces activités ?	Heures : minutes <input type="text"/> : <input type="text"/> hrs mins	P6 (a-b)
Se déplacer d'un endroit à l'autre			
<p>Les questions suivantes excluent les activités physiques dans le cadre de votre travail, que vous avez déjà mentionnées. Maintenant, je voudrais connaître votre façon habituelle de vous déplacer d'un endroit à l'autre ; par exemple pour aller au travail, faire des courses, aller au marché, aller à votre lieu consacré au culte. [Ajouter d'autres exemples si nécessaire]</p>			
7	Est-ce que vous effectuez des trajets d'au moins 10 minutes à pied ou à vélo ?	<p>Oui 1</p> <p>Non 2 Si Non, aller à P 10</p>	P7
8	Habituellement, combien de jours par semaine effectuez-vous des trajets d'au moins 10 minutes à pied ou à vélo ?	Nombre de jours <input type="text"/>	P8
9	Lors d'une journée habituelle, combien de temps consacrez-vous à vos déplacements à pied ou à vélo ?	Heures : minutes <input type="text"/> : <input type="text"/> hrs mins	P9 (a-b)

Question	Réponse	Code	
Activités de loisirs			
Les questions suivantes excluent les activités liées au travail et aux déplacements que vous avez déjà mentionnées. Maintenant je souhaiterais vous poser des questions sur le sport, le fitness et les activités de loisirs. <i>[Insérer les termes appropriés]</i>			
10	Est-ce que vous pratiquez des sports, du fitness ou des activités de loisirs de forte intensité qui nécessitent une augmentation importante de la respiration ou du rythme cardiaque comme [courir ou jouer au football] pendant au moins dix minutes d'affilée ? [INSÉRER DES EXEMPLES LOCAUX ET MONTRER LES CARTES]	Oui 1 Non 2 <i>Si Non, aller à P 13</i>	P10
11	Habituellement, combien de jours par semaine pratiquez-vous une activité sportive, du fitness ou d'autres activités de loisirs de forte intensité ?	Nombre de jours <input type="text"/>	P11
12	Lors d'une journée habituelle, combien de temps y consacrez-vous ?	Heures : minutes <input type="text"/> : <input type="text"/> hrs mins	P12 (a-b)
13	Est-ce que vous pratiquez des sports, du fitness ou des activités de loisirs d'intensité modérée qui nécessitent une petite augmentation de la respiration ou du rythme cardiaque comme la marche rapide [faire du vélo, nager, jouer au volley] pendant au moins dix minutes d'affilée ? [INSÉRER DES EXEMPLES LOCAUX ET MONTRER LES CARTES]	Oui 1 Non 2 <i>Si Non, aller à P16</i>	P13
14	Habituellement, combien de jours par semaine pratiquez-vous une activité sportive, du fitness ou d'autres activités de loisirs d'intensité modérée ?	Nombre de jours <input type="text"/>	P14
15	Lors d'une journée habituelle, combien de temps y consacrez-vous ?	Heures : minutes <input type="text"/> : <input type="text"/> hrs mins	P15 (a-b)
Comportement sédentaire			
La question suivante concerne le temps passé en position assise ou couchée, au travail, à la maison, en déplacement, à rendre visite à des amis, et inclut le temps passé [assis devant un bureau, se déplacer en voiture, en bus, en train, à lire, jouer aux cartes ou à regarder la télévision] mais n'inclut pas le temps passé à dormir. [INSÉRER DES EXEMPLES LOCAUX ET MONTRER LES CARTES]			
16	Combien de temps passez-vous en position assise ou couchée lors d'une journée habituelle ?	Heures : minutes <input type="text"/> : <input type="text"/> hrs mins	P16 (a-b)

5. Annexe E : Statistiques des 3 domaines d'intérêt pour chaque groupe

Tableau 2. Résumé des statistiques des 3 domaines d'intérêt pour chaque groupe

	Variables dépendantes	Jeunes adultes moins actifs (YA_{-a}) n=16	Jeunes adultes plus actifs (YA_{+a}) n=15	Adultes plus âgés moins actifs (OA_{-a}) n=14	Adultes plus âgés plus actifs (OA_{+a}) n=14	Effet fixe (Fddl, p-val.)	Post Hoc Bonferroni sig. (p_{bonf}<0.05)
Paramètres spatio-temporels	Temps de contact (Tc) en (s)	0.685731 ±0.0454626 (6.6%)	0.693567 ±0.0335667 (4.8%)	0.588743 ±0.0621622 (10.6%)	0.638221 ±0.0687288 (10.8%)	F _{3,55} =11.883, p<0.001	OA _{+a} -YA _{+a} (p=0.045) OA _{-a} -YA _{-a} (p<0.001)
	Temps d'oscillation (To) en (s)	0.444075 ±0.0384273 (8.7%)	0.437380 ±0.0334329 (7.6%)	0.377607 ±0.0445253 (11.8%)	0.425093 ±0.0488164 (11.5%)	F _{3,55} =7.575, p<0.001	OA _{-a} - OA _{+a} (p=0.022) OA _{-a} -YA _{+a} (p=0.002) OA _{-a} -YA _{-a} (p<0.001)
	Fréquence de foulée (Freq) en (Hz)	0.888131 ±0.0516534 (5.8%)	0.885633 ±0.0347216 (3.9%)	1.043900 ±0.1003158 (9.6%)	0.949479 ±0.0989963 (10.4%)	F _{3,55} =13.946, p<0.001	OA _{-a} - OA _{+a} (p=0.01) OA _{-a} -YA _{-a} (p<0.001)
	Longueur de foulée (Lf) en (m)	1.286119 ±0.0683960 (5.3%)	1.304187 ±0.0531462 (4.1%)	1.107971 ±0.1078642 (9.7%)	1.221764 ±0.1097274 (9.0%)	F _{3,55} =15.009, p<0.001	OA _{-a} - OA _{+a} (p=0.006) OA _{-a} -YA _{-a} (p<0.001)
	Force verticale antérieure maximale (F_{vANT}) en (BW)					H ₍₃₎ =10.103, p=0.018	OA _{-a} -YA _{+a} (p=0.028) OA _{+a} -YA _{-a} (p=0.024) OA _{-a} -YA _{-a} (p=0.012)
Transition du pas	Force verticale postérieure maximale (F_{vPOST}) en (BW)	1.068600 ±0.0474880 (4.4%)	1.041773 ±0.0557508 (5.4%)	0.988121 ±0.1029172 (10.4%)	0.987207 ±0.0659278 (6.7%)	F _{3,55} =4.963, p=0.004	OA _{-a} -YA _{-a} (p=0.017) OA _{+a} -YA _{-a} (p=0.015)
	Temps de Vvmin relatif au contact du pied (T_{vmin}) en (ms)	-65.966987 ±35.3981982 (-53.7%)	-57.784853 ±43.4791394 (-75.2%)	-11.511171 ±35.3785091 (-307.3%)	-8.240236 ±21.7135482 (-263.5%)	F _{3,55} =10.994, p<0.001	OA _{-a} -YA _{+a} (p=0.005) OA _{+a} -YA _{+a} (p=0.002) OA _{-a} -YA _{-a} (p=0.001) OA _{+a} -YA _{-a} (p<0.001)
Mécanisme pendulaire de la marche	Travail potentiel normalisé (Wp_{norm}) en (J.kg⁻¹.m⁻¹)	0.448419 ±0.0763960 (17.0%)	0.482433 ±0.0758460 (15.7%)	0.490450 ±0.0849590 (17.3%)	0.501293 ±0.0811689 (16.2%)	F _{3,55} =1.261, p=0.297	
	Travail cinétique normalisé (Wk_{norm}) en (J.kg⁻¹.m⁻¹)	0.387963 ±0.0743355 (19.2%)	0.402007 ±0.0410984 (10.2%)	0.365279 ±0.0612724 (16.8%)	0.378929 ±0.0373914 (9.9%)	F _{3,55} =1.097, p=0.358	
	Travail externe total du CoM normalisé (Wcom_{norm}) en (J.kg⁻¹.m⁻¹)	0.261044 ±0.0625658 (24.0%)	0.267473 ±0.0424144 (15.9%)	0.320693 ±0.0732117 (22.8%)	0.265243 ±0.0403084 (15.2%)	F _{3,55} =3.574, p=0.02	OA _{-a} -YA _{-a} (p=0.033)
	Recovery (Rec) en (%)	72.0719 ±5.33815 (7.4%)	72.9473 ±4.12473 (5.7%)	65.4036 ±6.76717 (10.3%)	72.6943 ±4.45111 (6.1%)	F _{3,55} =6.674, p=0.001	OA _{-a} -YA _{-a} (p=0.006) OA _{-a} -OA _{+a} (p=0.003) OA _{-a} -YA _{+a} (p=0.002)

Notes : Coefficient de Variation (CV), Degré de liberté (ddl), p-valeur (p-val.) du test d'effet fixe de type III du Modèle linéaire mixte (LMM). p-valeur de la correction de Bonferroni (p_{bonf}) Seuil de signification (sig.) fixé à p<0.05

6. Annexe F : statistiques des 3 domaines d'intérêt pour l'âge et le niveau d'activité physique

	Variables dépendantes	Effet fixe Age (Fddl, <i>p-val.</i>)	Effet fixe niveau d'activité physique (Fddl, <i>p-val.</i>)	Effet fixe Age* niv d'AP (Fddl, <i>p-val.</i>)
Paramètres spatio-temporels	Temps de contact (Tc) en (s)	F _{1,55} =29.713, <i>p</i> <0.001	F _{1,55} =6.058, <i>p</i> =0.017	F _{1,55} =1.210, <i>p</i> =0.276
	Temps d'oscillation (To) en (s)	F _{1,55} =13.310, <i>p</i> =0.001	F _{1,55} =4.447, <i>p</i> =0.040	F _{1,55} =5.178, <i>p</i> =0.027
	Fréquence de foulée (Freq) en (Hz)	F _{1,55} =30.940, <i>p</i> <0.001	F _{1,55} =7.581, <i>p</i> =0.008	F _{1,55} =4.167, <i>p</i> =0.046
	Longueur de foulée (Lf) en (m)	F _{1,55} =33.117, <i>p</i> <0.001	F _{1,55} =11.411, <i>p</i> =0.001	F _{1,55} =2.834, <i>p</i> =0.098
Transition du pas	Force verticale antérieure maximale (F_{vANT}) en (BW)			
	Force verticale postérieure maximale (F_{vPOST}) en (BW)	F _{1,55} =13.750, <i>p</i> <0.001	F _{1,55} =0.310, <i>p</i> =0.580	F _{1,55} =0.257, <i>p</i> =0.614
	Temps de Vvmin relatif au contact du pied (T_V_{vmin}) en (ms)	F _{1,55} =32.350, <i>p</i> <0.001	F _{1,55} =0.133, <i>p</i> =0.717	F _{1,55} <0.001, <i>p</i> =0.993
Mécanisme pendulaire de la marche	Travail potentiel normalisé (Wp_norm) en (J.kg ⁻¹ .m ⁻¹)	F _{1,55} =2.316, <i>p</i> =0.134	F _{1,55} =1.176, <i>p</i> =0.283	F _{1,55} =0.315, <i>p</i> =0.577
	Travail cinétique normalisé (Wk_norm) en (J.kg ⁻¹ .m ⁻¹)	F _{1,55} =2.357, <i>p</i> =0.130	F _{1,55} =1.958, <i>p</i> =0.167	F _{1,55} =0.208, <i>p</i> =0.650
	Travail externe total du CoM normalisé (Wcom_norm) en (J.kg ⁻¹ .m ⁻¹)	F _{1,55} =3.956, <i>p</i> =0.052	F _{1,55} =1.764, <i>p</i> =0.190	F _{1,55} =6.073, <i>p</i> =0.017
	Recovery (Rec) en (%)	F _{1,55} =6.289, <i>p</i> =0.015	F _{1,55} =7.543, <i>p</i> =0.008	F _{1,55} =6.578, <i>p</i> =0.013

Notes : AP = Activité physique. Degré de liberté (ddl), p-valeur (*p-val.*) du test d'effet fixe de type III du Modèle linéaire mixte (LMM). Seuil de signification (sig.) fixé à *p*<0.05

7. Annexe G : Résumé des différences statistiquement significatives entre groupes

Tableau 4. Résumé des différences statistiquement significatives entre groupes

Variables dépendantes Δ entre groupes (Cohen's d)	Tc en (s)	To en (s)	Freq en (Hz)	Lf en (m)	F _{vPOST} en (BW)	T_Vvmin en (ms)	Wcom_n en (J.kg ⁻¹ .m ⁻¹)	Rec en (%)
YA _{-a} vs YA _{+a}								
OA _{-a} vs OA _{+a}		-0.0475 (-0.99)	0.0944 (0.97)	-0.1138 (-0.99)				-7.29 (-1.22)
OA _{-a} vs YA _{-a}	-0.0970 (-1.45)	-0.0665 (-1.38)	0.1558 (1.59)	-0.1781 (-1.56)	-0.0805 (-1.04)	54.4558 (1.26)	0.0596 (0.99)	-6.67 (-1.12)
OA _{-a} vs YA _{+a}	-0.1048 (-1.56)	-0.0598 (-1.25)	0.1583 (1.62)	-0.1962 (-1.71)		46.2737 (1.07)		-7.54 (-1.26)
OA _{+a} vs YA _{-a}					-0.0814 (-1.06)	57.7268 (1.34)		
OA _{+a} vs YA _{+a}	-0.0553 (-0.82)					49.5446 (1.15)		

Notes : Δ = différence. Valeurs des différences statistiquement significatives après Post Hoc de Bonferroni. Cohen's d = différence des moyennes/écart-type = $(\Delta \bar{x})/s$. Cohen's d > |0.8| en valeur absolue indique une taille d'effet large

VIII. Bibliographie

- Aboutorabi, A., Arazpour, M., Bahramizadeh, M., Hutchins, S. W., & Fadayeatan, R. (2015). The effect of aging on gait parameters in able-bodied older subjects: A literature review. *Aging Clin Exp Res*, 28(3), 393-405. <https://doi.org/10.1007/s40520-015-0420-6>
- Ainsworth, B. E., Haskell, W. L., Whitt, M. C., Irwin, M. L., Swartz, A. M., Strath, S. J., O'Brien, W. L., Bassett, D. R., Schmitz, K. H., Emplaincourt, P. O., Jacobs, D. R., & Leon, A. S. (2000). Compendium of Physical Activities: An update of activity codes and MET intensities: *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 32(Supplement), S498-S516. <https://doi.org/10.1097/00005768-200009001-00009>
- Alhasan, H., Hood, V., & Mainwaring, F. (2017). The effect of visual biofeedback on balance in elderly population: A systematic review. *Clinical Interventions in Aging*, Volume 12, 487-497. <https://doi.org/10.2147/CIA.S127023>
- Bangsbo, J., Blackwell, J., Boraxbekk, C.-J., Caserotti, P., Dela, F., Evans, A. B., Jespersen, A. P., Gliemann, L., Kramer, A. F., Lundbye-Jensen, J., Mortensen, E. L., Lassen, A. J., Gow, A. J., Harridge, S. D. R., Hellsten, Y., Kjaer, M., Kujala, U. M., Rhodes, R. E., Pike, E. C. J., ... Viña, J. (2019). Copenhagen Consensus statement 2019: Physical activity and ageing. *British Journal of Sports Medicine*, 53(14), 856-858. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2018-100451>
- Beauchet, O., Allali, G., Sekhon, H., Verghese, J., Guilain, S., Steinmetz, J.-P., Kressig, R. W., Barden, J. M., Szturm, T., Launay, C. P., Grenier, S., Bherer, L., Liu-Ambrose, T., Chester, V. L., Callisaya, M. L., Srikanth, V., Léonard, G., De Cock, A.-M., Sawa, R., ... Helbostad, J. L. (2017). Guidelines for Assessment of Gait and Reference Values for Spatiotemporal Gait Parameters in Older Adults: The Biomathics and Canadian Gait Consortiums Initiative. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11, 353. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00353>
- Boyer, K. A., Andriacchi, T. P., & Beaupre, G. S. (2012). The role of physical activity in changes in walking mechanics with age. *Gait & Posture*, 36(1), 149-153. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2012.02.007>
- Boyer, K. A., Hayes, K. L., Umberger, B. R., Adamczyk, P. G., Bean, J. F., Brach, J. S., Clark, B. C., Clark, D. J., Ferrucci, L., Finley, J., Franz, J. R., Golightly, Y. M., Hortobágyi, T., Hunter, S., Narici, M., Nicklas, B., Roberts, T., Sawicki, G., Simonsick, E., & Kent, J. A. (2023). Age-related changes in gait biomechanics and their impact on the metabolic cost of walking: Report from a National Institute on Aging workshop. *Experimental Gerontology*, 173, 112102. <https://doi.org/10.1016/j.exger.2023.112102>
- Boyer, K. A., Johnson, R. T., Banks, J. J., Jewell, C., & Hafer, J. F. (2017). Systematic review and meta-analysis of gait mechanics in young and older adults. *Experimental Gerontology*, 95, 63-70. <https://doi.org/10.1016/j.exger.2017.05.005>
- Browne, M. G., & Franz, J. R. (2019). Ankle power biofeedback attenuates the distal-to-proximal redistribution in older adults. *Gait & Posture*, 71, 44-49. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.04.011>

- Buddhadev, H. H., & Martin, P. E. (2016). Effects of age and physical activity status on redistribution of joint work during walking. *Gait & Posture*, *50*, 131-136. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2016.08.034>
- Cappellini, G., Ivanenko, Y. P., Dominici, N., Poppele, R. E., & Lacquaniti, F. (2010). Migration of Motor Pool Activity in the Spinal Cord Reflects Body Mechanics in Human Locomotion. *Journal of Neurophysiology*, *104*(6), 3064-3073. <https://doi.org/10.1152/jn.00318.2010>
- Cavagna, G. A., Thys, H., & Zamboni, A. (1976). The sources of external work in level walking and running. *The Journal of Physiology*, *262*(3), 639-657. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1976.sp011613>
- Cavagna, G. A., Willems, P. A., Legramandi, M. A., & Heglund, N. C. (2002). *Cavagna, G.A.; Willems, P.A.; Legramandi, M.A.; Heglund, N.C. Pendular Energy Transduction within the Step in Human Walking. J. Exp. Biol.* 2002, *205*, 3413–3422. 205, 3414-3422.
- Chastan, N., Do, M. C., Bonneville, F., Torny, F., Bloch, F., Westby, G. W., Dormont, D., Agid, Y., & Welter, M. L. (2009). Gait and balance disorders in Parkinson's disease: Impaired active braking of the fall of centre of gravity. *Mov Disord*, *24*(2), 188-195. <https://doi.org/10.1002/mds.22269>
- Chastan, N., Westby, G. W., du Montcel, S. T., Do, M. C., Chong, R. K., Agid, Y., & Welter, M. L. (2010). Influence of sensory inputs and motor demands on the control of the centre of mass velocity during gait initiation in humans. *Neurosci Lett*, *469*(3), 400-404. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2009.12.038>
- Chastan, N., Westby, G. W., Yelnik, J., Bardinet, E., Do, M. C., Agid, Y., & Welter, M. L. (2009). Effects of nigral stimulation on locomotion and postural stability in patients with Parkinson's disease. *Brain*, *132*(Pt 1), 172-184. <https://doi.org/10.1093/brain/awn294>
- Chodzko-Zajko, W. J., Proctor, D. N., Fiatarone Singh, M. A., Minson, C. T., Nigg, C. R., Salem, G. J., & Skinner, J. S. (2009). American College of Sports Medicine position stand. Exercise and physical activity for older adults. *Med Sci Sports Exerc*, *41*(7), 1510-1530. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181a0c95c>
- Chong, R. K., Chastan, N., Welter, M. L., & Do, M. C. (2009). Age-related changes in the center of mass velocity control during walking. *Neurosci Lett*, *458*(1), 23-27. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2009.04.022>
- Ciprandi, D., Bertozzi, F., Zago, M., Ferreira, C. L. P., Boari, G., Sforza, C., & Galvani, C. (2017). Study of the association between gait variability and physical activity. *Eur Rev Aging Phys Act*, *14*, 19. <https://doi.org/10.1186/s11556-017-0188-0>
- Clark, D. J., Hawkins, K. A., Winesett, S. P., Cox, B. A., Pesquera, S., Miles, J. W., Fuller, D. D., & Fox, E. J. (2022). Enhancing Locomotor Learning With Transcutaneous Spinal Electrical Stimulation and Somatosensory Augmentation: A Pilot Randomized Controlled Trial in Older Adults. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *14*, 837467. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2022.837467>
- Clark, D. J., Pojednic, R. M., Reid, K. F., Patten, C., Pasha, E. P., Phillips, E. M., & Fielding, R. A. (2013). Longitudinal Decline of Neuromuscular Activation and Power in Healthy Older Adults. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, *68*(11), 1419-1425. <https://doi.org/10.1093/gerona/glt036>

- Das Gupta, S., Bobbert, M. F., & Kistemaker, D. A. (2019). The Metabolic Cost of Walking in healthy young and older adults – A Systematic Review and Meta Analysis. *Scientific Reports*, 9(1), 9956. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45602-4>
- Assemblée Générale des Nations Unies. (2020). Décennie des Nations Unies pour le vieillissement en bonne santé(2021-2030). (A/RES/75/131). Retrieved from <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N20/363/88/PDF/N2036388.pdf?OpenElement>
- DeVita, P., & Hortobagyi, T. (2000). Age causes a redistribution of joint torques and powers during gait. *Journal of Applied Physiology*, 88(5), 1804-1811. <https://doi.org/10.1152/jappl.2000.88.5.1804>
- Dewolf, A. H., Ivanenko, Y. P., Lacquaniti, F., & Willems, P. A. (2017). Pendular energy transduction within the step during human walking on slopes at different speeds. *PLOS ONE*, 12(10), e0186963. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186963>
- Dewolf, A. H., Ivanenko, Y. P., Zelik, K. E., Lacquaniti, F., & Willems, P. A. (2019). Differential activation of lumbar and sacral motor pools during walking at different speeds and slopes. *Journal of Neurophysiology*, 122(2), 872-887. <https://doi.org/10.1152/jn.00167.2019>
- Dewolf, A. H., Meurisse, G. M., Ivanenko, Y., Lacquaniti, F., Bastien, G. J., & Schepens, B. (2022). Relation between Step-To-Step Transition Strategies and Walking Pattern in Older Adults. *Applied Sciences*, 12(10), 5055. <https://doi.org/10.3390/app12105055>
- Dewolf, A. H., Sylos-Labini, F., Cappellini, G., Lacquaniti, F., & Ivanenko, Y. (2020). Emergence of Different Gaits in Infancy : Relationship Between Developing Neural Circuitries and Changing Biomechanics. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 473. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00473>
- Dewolf, A. H., Sylos-Labini, F., Cappellini, G., Zhvansky, D., Willems, P. A., Ivanenko, Y., & Lacquaniti, F. (2021). Neuromuscular Age-Related Adjustment of Gait When Moving Upwards and Downwards. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15, 749366. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.749366>
- Domingos, C., Pêgo, J. M., & Santos, N. C. (2021). Effects of physical activity on brain function and structure in older adults : A systematic review. *Behavioural Brain Research*, 402, 113061. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2020.113061>
- Donelan, J. M., Kram, R., & Kuo, A. D. (2002). Mechanical work for step-to-step transitions is a major determinant of the metabolic cost of human walking. *Journal of Experimental Biology*, 205(23), 3717-3727. <https://doi.org/10.1242/jeb.205.23.3717>
- Drieskens, S., Berete, F., & Charafeddine, R. (2018). Accidents. Bruxelles, Belgique : Sciensano ; Numéro de rapport : D/2020/14.440/59. [D/2020/14.440/59](https://www.enquetesante.be), 19-22. www.enquetesante.be
- Egerton, T., Paterson, K., & Helbostad, J. L. (2017). The Association Between Gait Characteristics and Ambulatory Physical Activity in Older People : A Cross-Sectional and Longitudinal Observational Study Using Generation 100 Data. *J Aging Phys Act*, 25(1), 10-19. <https://doi.org/10.1123/japa.2015-0252>

- Elm, E. V., Altman, D. G., Egger, M., Pocock, S. J., Gøtzsche, P. C., & Vandenbroucke, J. P. (2007). Strengthening the reporting of observational studies in epidemiology (STROBE) statement: Guidelines for reporting observational studies. *BMJ*, *335*(7624), 806-808. <https://doi.org/10.1136/bmj.39335.541782.AD>
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A.-G., & Buchner, A. (2007). G*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, *39*(2), 175-191. <https://doi.org/10.3758/BF03193146>
- Fukuchi, C. A., Fukuchi, R. K., & Duarte, M. (2019). Effects of walking speed on gait biomechanics in healthy participants: A systematic review and meta-analysis. *Systematic Reviews*, *8*(1), 153. <https://doi.org/10.1186/s13643-019-1063-z>
- Gedda, M. (2015). Traduction française des lignes directrices STROBE pour l'écriture et la lecture des études observationnelles. *Kinésithérapie, la Revue*, *15*(157), 34-38. <https://doi.org/10.1016/j.kine.2014.11.003>
- Ghai, S., Ghai, I., & Effenberg, A. O. (2018). Effect of Rhythmic Auditory Cueing on Aging Gait: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Aging and Disease*, *9*(5), 901. <https://doi.org/10.14336/AD.2017.1031>
- Godfrey, A., Lord, S., Galna, B., Mathers, J. C., Burn, D. J., & Rochester, L. (2014). The association between retirement and age on physical activity in older adults. *Age Ageing*, *43*(3), 386-393. <https://doi.org/10.1093/ageing/aft168>
- Gomes, M., Figueiredo, D., Teixeira, L., Poveda, V., Paúl, C., Santos-Silva, A., & Costa, E. (2017). Physical inactivity among older adults across Europe based on the SHARE database. *Age and Ageing*, *46*(1), 71-77. <https://doi.org/10.1093/ageing/afw165>
- Gonzalez-Freire, M., de Cabo, R., Studenski, S. A., & Ferrucci, L. (2014). The Neuromuscular Junction: Aging at the Crossroad between Nerves and Muscle. *Front Aging Neurosci*, *6*, 208. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2014.00208>
- Hassan, A. S., Fajardo, M. E., Cummings, M., McPherson, L. M., Negro, F., Dewald, J. P. A., Heckman, C. J., & Pearcey, G. E. P. (2021). Estimates of persistent inward currents are reduced in upper limb motor units of older adults. *The Journal of Physiology*, *599*(21), 4865-4882. <https://doi.org/10.1113/JP282063>
- Hepple, R. T., & Rice, C. L. (2016). Innervation and neuromuscular control in ageing skeletal muscle. *J Physiol*, *594*(8), 1965-1978. <https://doi.org/10.1113/JP270561>
- Herssens, N., Verbecque, E., Hallemans, A., Vereeck, L., Van Rompaey, V., & Saeys, W. (2018). Do spatiotemporal parameters and gait variability differ across the lifespan of healthy adults? A systematic review. *Gait & Posture*, *64*, 181-190. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.06.012>
- Hollman, J. H., McDade, E. M., & Petersen, R. C. (2011). Normative spatiotemporal gait parameters in older adults. *Gait & Posture*, *34*(1), 111-118. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2011.03.024>
- Hunter, S. K., Pereira, H. M., & Keenan, K. G. (2016). The aging neuromuscular system and motor performance. *J Appl Physiol (1985)*, *121*(4), 982-995. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00475.2016>
- Jerome, G. J., Ko, S., Kauffman, D., Studenski, S. A., Ferrucci, L., & Simonsick, E. M. (2015). Gait characteristics associated with walking speed decline in

- older adults : Results from the Baltimore Longitudinal Study of Aging. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, 60(2), 239-243. <https://doi.org/10.1016/j.archger.2015.01.007>
- Ko, S. U., Ling, S. M., Winters, J., & Ferrucci, L. (2009). Age-related mechanical work expenditure during normal walking : The Baltimore Longitudinal Study of Aging. *Journal of Biomechanics*, 42(12), 1834-1839. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2009.05.037>
- Leslie, E., Luna, V., & Gibson, A. L. (2023). Older Adult Aerobic Capacity, Muscular Strength, Fitness and Body Composition After 20+ Years of Exercise Training : A Systematic Review and Meta-Analysis. *Int J Exerc Sci*, 16(3), 620-637.
- Lord, S., Galna, B., Verghese, J., Coleman, S., Burn, D., & Rochester, L. (2013). Independent domains of gait in older adults and associated motor and nonmotor attributes : Validation of a factor analysis approach. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 68(7), 820-827. <https://doi.org/10.1093/gerona/gls255>
- McPhee, J. S., French, D. P., Jackson, D., Nazroo, J., Pendleton, N., & Degens, H. (2016). Physical activity in older age : Perspectives for healthy ageing and frailty. *Biogerontology*, 17(3), 567-580. <https://doi.org/10.1007/s10522-016-9641-0>
- Menz, H. B. (2003). Age-related differences in walking stability. *Age and Ageing*, 32(2), 137-142. <https://doi.org/10.1093/ageing/32.2.137>
- Meurisse, G. M., Bastien, G. J., & Schepens, B. (2019a). Effect of age and speed on the step-to-step transition phase during walking. *J Biomech*, 83, 253-259. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2018.12.001>
- Meurisse, G. M., Bastien, G. J., & Schepens, B. (2019b). The step-to-step transition mode : A potential indicator of first-fall risk in elderly adults? *PLoS One*, 14(8), e0220791. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220791>
- Musich, S., Wang, S. S., Ruiz, J., Hawkins, K., & Wicker, E. (2018). The impact of mobility limitations on health outcomes among older adults. *Geriatric Nursing*, 39(2), 162-169. <https://doi.org/10.1016/j.gerinurse.2017.08.002>
- Nascimento, L. R., De Oliveira, C. Q., Ada, L., Michaelsen, S. M., & Teixeira-Salmela, L. F. (2015). Walking training with cueing of cadence improves walking speed and stride length after stroke more than walking training alone : A systematic review. *Journal of Physiotherapy*, 61(1), 10-15. <https://doi.org/10.1016/j.jphys.2014.11.015>
- Nascimento, M. D. M., Gouveia, É. R., Marques, A., Gouveia, B. R., Marconcin, P., França, C., & Ihle, A. (2022). The Role of Physical Function in the Association between Physical Activity and Gait Speed in Older Adults : A Mediation Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(19), 12581. <https://doi.org/10.3390/ijerph191912581>
- Nunez-Lisboa, M., Bastien, G. J., Schepens, B., Lacquaniti, F., Ivanenko, Y., & Dewolf, A. H. (2023). Effect of age and speed on the step-to-step transition strategies in children. *J Biomech*, 157, 111704. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2023.111704>
- Nunez-Lisboa, M., Valero-Breton, M., & Dewolf, A. H. (2023). Unraveling age-related impairment of the neuromuscular system : Exploring biomechanical and neurophysiological perspectives. *Front Physiol*, 14, 1194889. <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1194889>
- Orssatto, L. B. R., Mesquita, R. N. O., & Phillips, K. M. (2021). Looking at the bigger PICTure : Understanding and counteracting the decline of persistent

- inward currents in older adults. *The Journal of Physiology*, 599(23), 5137-5139. <https://doi.org/10.1113/JP282370>
- Pate, R. R., Pratt, M., Blair, S. N., Haskell, W. L., Macera, C. A., Bouchard, C., Buchner, D., Ettinger, W., Heath, G. W., King, A. C., Kriska, A., Leon, A. S., Marcus, B. H., Morris, J., Paffenbarger, R. S., Jr, Patrick, K., Pollock, M. L., Rippe, J. M., Sallis, J., & Wilmore, J. H. (1995). Physical Activity and Public Health: A Recommendation From the Centers for Disease Control and Prevention and the American College of Sports Medicine. *JAMA*, 273(5), 402-407. <https://doi.org/10.1001/jama.1995.03520290054029>
- Paterson, D. H., Jones, G. R., & Rice, C. L. (2007). Ageing and physical activity: Evidence to develop exercise recommendations for older adults. *Canadian Journal of Public Health / Revue Canadienne de Sante'e Publique*, 98, S69-S108. <http://www.jstor.org/stable/41994847>
- Paterson, D. H., & Warburton, D. E. (2010). Physical activity and functional limitations in older adults: A systematic review related to Canada's Physical Activity Guidelines. *Int J Behav Nutr Phys Act*, 7, 38. <https://doi.org/10.1186/1479-5868-7-38>
- Peyré-Tartaruga, L. A., Dewolf, A. H., Di Prampero, P. E., Fábrika, G., Malatesta, D., Minetti, A. E., Monte, A., Pavei, G., Silva-Pereyra, V., Willems, P. A., & Zamparo, P. (2021). Mechanical work as a (key) determinant of energy cost in human locomotion: Recent findings and future directions. *Experimental Physiology*, 106(9), 1897-1908. <https://doi.org/10.1113/EP089313>
- Pieper, N. L., Baudendistel, S. T., Hass, C. J., Diaz, G. B., Krupenevich, R. L., & Franz, J. R. (2021). The metabolic and mechanical consequences of altered propulsive force generation in walking. *Journal of Biomechanics*, 122, 110447. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2021.110447>
- Rekant, J., Chambers, A., Suri, A., Hergenroeder, A., Sejdic, E., & Brach, J. (2023). Weekly minutes of moderate to vigorous physical activity is associated with movement quality in overweight and obese older adults, independent of age. *Aging Clinical and Experimental Research*, 35(12), 2941-2950. <https://doi.org/10.1007/s40520-023-02584-8>
- Rivière, F., Widad, F. Z., Speyer, E., Erpelding, M.-L., Escalon, H., & Vuillemin, A. (2018). Reliability and validity of the French version of the global physical activity questionnaire. *Journal of Sport and Health Science*, 7(3), 339-345. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2016.08.004>
- Roberts, C. E., Phillips, L. H., Cooper, C. L., Gray, S., & Allan, J. L. (2017). Effect of Different Types of Physical Activity on Activities of Daily Living in Older Adults: Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Aging and Physical Activity*, 25(4), 653-670. <https://doi.org/10.1123/japa.2016-0201>
- Row Lazzarini, B. S., & Kataras, T. J. (2016). Treadmill walking is not equivalent to overground walking for the study of walking smoothness and rhythmicity in older adults. *Gait & Posture*, 46, 42-46. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2016.02.012>
- Schellenbach, M., Lövdén, M., Verrel, J., Krüger, A., & Lindenberger, U. (2010). Adult age differences in familiarization to treadmill walking within virtual environments. *Gait & Posture*, 31(3), 295-299. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2009.11.008>

- Schmitt, A. C., Baudendistel, S. T., Lipat, A. L., White, T. A., Raffegeau, T. E., & Hass, C. J. (2021). Walking indoors, outdoors, and on a treadmill : Gait differences in healthy young and older adults. *Gait & Posture*, *90*, 468-474. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.09.197>
- Schrack, J. A., Zipunnikov, V., Simonsick, E. M., Studenski, S., & Ferrucci, L. (2016). Rising Energetic Cost of Walking Predicts Gait Speed Decline With Aging. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, *71*(7), 947-953. <https://doi.org/10.1093/gerona/glw002>
- Sedentary Behaviour Research, N. (2012). Letter to the editor : Standardized use of the terms « sedentary » and « sedentary behaviours ». *Appl Physiol Nutr Metab*, *37*(3), 540-542. <https://doi.org/10.1139/h2012-024>
- Shafizadeh, M., Bonner, S., Fraser, J., Parvinpour, S., Shabani, M., & Barnes, A. (2023). Effects of Sport Participation on Gait Coordination, Symmetry, and Variability in Older Adults. *Journal of Aging and Physical Activity*, *31*(6), 940-947. <https://doi.org/10.1123/japa.2022-0363>
- Sherrington, C., Fairhall, N. J., Wallbank, G. K., Tiedemann, A., Michaleff, Z. A., Howard, K., Clemson, L., Hopewell, S., & Lamb, S. E. (2019). Exercise for preventing falls in older people living in the community. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, *1*. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD012424.pub2>
- Steckhan, G. M. A., Fleig, L., Schwarzer, R., & Warner, L. M. (2022). Perceived Physical Functioning and Gait Speed as Mediators in the Association Between Fear of Falling and Quality of Life in Old Age. *Journal of Applied Gerontology*, *41*(2), 421-429. <https://doi.org/10.1177/0733464820979188>
- Stolze, H.-J. F., Kirsten Steinauer, Peter Vieregge ,Henning. (2000). Stride Parameters in Healthy Young and Old Women—Measurement Variability on a Simple Walkway. *Experimental Aging Research*, *26*(2), 159-168. <https://doi.org/10.1080/036107300243623>
- Studenski, S., Perera, S., Patel, K., Rosano, C., Faulkner, K., Inzitari, M., Brach, J., Chandler, J., Cawthon, P., Connor, E. B., Nevitt, M., Visser, M., Kritchevsky, S., Badinelli, S., Harris, T., Newman, A. B., Cauley, J., Ferrucci, L., & Guralnik, J. (2011). Gait Speed and Survival in Older Adults. *JAMA : the journal of the American Medical Association*, *305*(1), 50-58. <https://doi.org/10.1001/jama.2010.1923>
- Tate, J. J., & Milner, C. E. (2010). Real-Time Kinematic, Temporospacial, and Kinetic Biofeedback During Gait Retraining in Patients : A Systematic Review. *Physical Therapy*, *90*(8), 1123-1134. <https://doi.org/10.2522/ptj.20080281>
- Tudor-Locke, C., & Rowe, D. A. (2012). Using Cadence to Study Free-Living Ambulatory Behaviour. *Sports Medicine*, *42*(5), 381-398. <https://doi.org/10.2165/11599170-000000000-00000>
- United Nations. (2023). *World Social Report 2023 : Leaving no one behind in an ageing world* (Department of Economic and Social Affairs, Trad.; Sales No. E.23.IV.2; p. 18).
- Vogel, T., Brechat, P. H., Lepretre, P. M., Kaltenbach, G., Berthel, M., & Lonsdorfer, J. (2009). Health benefits of physical activity in older patients : A review. *Int J Clin Pract*, *63*(2), 303-320. <https://doi.org/10.1111/j.1742-1241.2008.01957.x>
- Wang, L., Peng, J., Ou-Yang, J., Gan, L., Zeng, S., Wang, H.-Y., Zuo, G.-C., & Qiu, L. (2022). Effects of Rhythmic Auditory Stimulation on Gait and

Motor Function in Parkinson's Disease : A Systematic Review and Meta-Analysis of Clinical Randomized Controlled Studies. *Frontiers in Neurology*, *13*, 818559. <https://doi.org/10.3389/fneur.2022.818559>

Willems, P. A., & Gosseye, T. P. (2013). Does an instrumented treadmill correctly measure the ground reaction forces? *Biology Open*, *2*(12), 1421-1424. <https://doi.org/10.1242/bio.20136379>

Wullems, J. A., Verschueren, S. M., Degens, H., Morse, C. I., & Onambele, G. L. (2016). A review of the assessment and prevalence of sedentarism in older adults, its physiology/health impact and non-exercise mobility countermeasures. *Biogerontology*, *17*(3), 547-565. <https://doi.org/10.1007/s10522-016-9640-1>

Résumé

Contexte : Lors du vieillissement, des modifications structurales, physiologiques et fonctionnelles surviennent. Celles-ci impactent la marche et par conséquent l'autonomie, la qualité de vie et la participation sociale de nos aînés. Le rôle protecteur de l'activité physique contre ces changements mérite d'être exploré. Méthode : Les paramètres d'une marche à 4 km.h⁻¹ sur tapis roulant ont été analysés chez 28 personnes âgées de plus de 65 ans et 31 âgées de 20 à 35 ans. Le niveau d'activité physique a été recueilli à l'aide du GPAQ 2.0 en version française. Résultats : Un effet de l'âge est observé pour tous les paramètres, hormis pour le travail potentiel, cinétique et total du CoM. Les groupes plus jeunes ont des paramètres similaires. Les groupes plus âgés et de niveaux différents d'activité physique ont une fréquence ($p=0.01$) et une longueur de foulée ($p=0.006$), un temps d'oscillation ($p=0.022$), ainsi qu'une recovery ($p=0.003$) différents. Conclusion : Ces résultats suggéreraient des modifications liées à l'âge de l'ensemble des paramètres spatio-temporels et de transition du pas ainsi que de la recovery. Néanmoins, une pratique plus importante d'activité physique semblerait atténuer les modifications du temps d'oscillation, de la fréquence et de la longueur de foulée, de même que pour la recovery.

