

Université de Montréal

Est-ce que les golfeurs élités ont des habiletés proprioceptives supérieures aux non-athlètes ?

par

Gabriel Massé-Barbeau

École de kinésiologie et des sciences de l'activité physique,

Faculté de Médecine

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures en vue de l'obtention du grade de Maîtrise (M.Sc.)
en Sciences de l'activité physique

Mars 2023

© Gabriel Massé-Barbeau, 2023

Université de Montréal

École de kinésiologie et des sciences de l'activité physique, Faculté de Médecine

Ce mémoire intitulé

Est-ce que les golfeurs élités ont des habiletés proprioceptives supérieures aux non-athlètes ?

Présenté par

Gabriel Massé-Barbeau

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes

Jason Neva

Président rapporteur

Julie Messier

Directrice de recherche

Nicolas Berryman

Membre du jury

Résumé

Des évidences suggèrent que l'entraînement golfique améliore l'acuité proprioceptive et la stabilité posturale. Cependant, la proprioception du membre supérieur des golfeurs experts n'a jamais été évaluée. De plus, aucune étude ne s'est intéressée à la demande attentionnelle de la performance motrice des golfeurs élités. Nous avons comparé la performance de golfeurs élités à celle de non-athlètes sédentaires dans deux tâches motrices effectuées sans vision : une tâche d'atteintes manuelles vers des cibles proprioceptives situées dans l'espace tridimensionnel et une tâche de limites de la stabilité posturale dynamique. Ces tâches étaient effectuées isolément (tâche simple) ou simultanément à une tâche cognitive attentionnelle de soustraction mathématique (tâche double). La précision et la variabilité des atteintes manuelles étaient mesurées à l'aide d'un système d'analyse de mouvement. Les limites de la stabilité posturale étaient quantifiées à partir des déplacements des centres de pression obtenus à l'aide d'une plateforme de force. Nos résultats démontrent que les atteintes manuelles des golfeurs élités sont moins variables que ceux des sujets témoins uniquement dans la condition de tâche double. La performance cognitive des golfeurs est également meilleure que celles des sujets témoins en condition de tâche double. Par ailleurs, les limites médio-latérales de la stabilité posturale des golfeurs élités sont plus grandes que les non-athlètes et mobilisent, en moyenne, moins de ressources attentionnelles. Ensemble, ces résultats suggèrent que l'entraînement golfique augmente l'efficacité de contrôle proprioceptif des mouvements de bras et de la stabilité posturale et diminue les exigences attentionnelles de la performance motrice.

Mots clés : proprioception, demande attentionnelle, contrôle postural, athlète.

Abstract

Evidence suggests that golf training improves proprioceptive acuity and postural stability. However, proprioceptive sensitivity at the upper limb has never been investigated in expert golfers. Furthermore, no previous study assessed the attentional demand of motor performance in elite golfers. We compared the performance of elite golfers to sedentary non-athletes in two motor tasks performed without vision: a task involving reaching movements to proprioceptive targets located in three-dimensional space and a dynamic postural stability limit task. These tasks were performed alone (single-task) and simultaneously to a cognitive-attentional subtraction task (dual-task). The accuracy and variability of reaching movements were measured using a motion analysis system. The limits of postural stability were quantified from center of pressure displacements recorded with a force platform. Our results demonstrated that reaching movements of elite golfers were less variable than those of control subjects only in the dual task condition. As well, the cognitive performance of elite golfers was better than those of non-athletes in the dual task condition. Moreover, the medio-lateral stability limits of elite golfers were larger than those of non-athletes and, on average, mobilized less attentional resources. Together, these results suggest that golf training increases the efficiency of the proprioceptive control of arm movements and postural stability and decreases the attentional demand of motor performance.

Key words : proprioception, attentional demand, postural control, athlete

Table des matières

Résumé.....	iii
Abstract.....	iv
Table des matières.....	v
Liste des figures.....	viii
Liste des tableaux.....	ix
Listes des abréviations.....	x
Remerciements.....	xi
CHAPITRE 1 – Introduction.....	1
CHAPITRE 2 – Revue de littérature.....	4
2.1 – Qu’est-ce que la proprioception ?.....	4
2.2 – Quel est le rôle de la proprioception dans le contrôle de l’atteinte manuelle et la stabilité posturale?.....	5
2.2.1 – La contribution de la proprioception dans l’atteinte manuelle.....	5
2.2.2 – La contribution de la proprioception dans le contrôle postural.....	6
2.3 – Comment mesurer les sensations proprioceptives?.....	8
2.4 – Est-ce que la proprioception de l’athlète d’élite est supérieure?.....	9
2.5 – Que savons-nous sur la proprioception du golfeur?.....	12
2.5.1 – Contrôle postural chez les golfeurs.....	12
2.6 – Est-ce que la demande attentionnelle de la performance sensorimotrice de l’athlète est inférieure à celles des non-athlètes sédentaires?.....	13
2.6.1 – Est-ce que le coût attentionnel de la performance sensorimotrice de l’athlète est inférieur à celui des non-athlètes sédentaires?.....	16
CHAPITRE 3 – Objectifs et hypothèses.....	18
3.1 – Objectifs.....	18
3.2 – Hypothèses.....	18
CHAPITRE 4 – Méthodologie.....	19
4.1 – Participants.....	19
4.2 – Tâche cognitive attentionnelle de soustraction mathématique.....	20
4.2.1 – Station expérimentale et procédures.....	20
4.2.2 – Indices de performance.....	20
4.2.3 – Analyses de données.....	20

4.3 – Tâche d’atteinte manuelle dans un espace tridimensionnel	21
4.3.1 – Station expérimentale et procédures.....	21
4.3.2 – Tâche d’atteintes manuelles	22
4.3.3 – Tâche d’atteintes manuelles avec tâche de soustraction de mathématique (n-3).....	23
4.3.4 – Analyse de données.....	23
4.3.5 – Indices de performance.....	24
4.4 – Tâche de la limite de la stabilité posturale	25
4.4.1 – Station expérimentale et procédures.....	25
4.4.2 – Analyse de données.....	26
4.4.3 – Indices de performance.....	26
4.5 – Analyses statistiques	27
CHAPITRE 5 – Résultats	28
5.1 – Atteinte manuelle 3D	28
5.1.1 – Erreurs absolues	28
5.1.2 – Erreurs variables.....	28
5.2 – Coût attentionnel de la tâche motrice d’atteintes manuelles	29
5.2.1 – Erreurs absolues	29
5.2.2 – Erreurs variables.....	29
5.2.3 – Performances cognitives simple et double et coût attentionnel de la tâche cognitive.....	29
5.3 – Limites de la stabilité	32
5.3.1 – Directions antéropostérieures.....	32
5.3.2 – Directions médio-latérales	35
5.4 – Erreurs quadratiques moyennes	35
5.4.1 – Directions antéropostérieures.....	35
5.4.2 – Directions médio-latérales	37
5.5 – Coût attentionnel de la tâche posturale sur les limites de la stabilité médio-latérales	37
5.5.1 – Performances cognitives simple et double et coût attentionnel de la tâche cognitive.....	38
CHAPITRE 6 – Discussion	40
6.1 – Tâche d’atteintes manuelles tridimensionnelle	40
6.1.1 – Condition de tâche simple.....	40
6.1.2 – Condition de tâche double	43
6.2 – Limites de la stabilité posturale	47
6.2.1 – Condition de tâche simple.....	47

6.2.2 – Condition de tâche double	51
6.3 - Les limites de l'étude	54
6.4 – Les futures analyses	55
6.5 – Les futures études	56
Conclusion	57
Bibliographie	58

Liste des figures

Figure 1 : Protocole de la tâche d'atteintes manuelles 3D	22
Figure 2 : Atteinte manuelle 3D.....	31
Figure 3 : Coût attentionnel de la tâche cognitive pendant l'atteinte manuelle.....	32
Figure 4 : Limites de la stabilité posturale antéropostérieures et médio-latérales.....	34
Figure 5 : Erreurs quadratiques moyennes antéropostérieures et médio-latérales.....	36
Figure 6 : Coût attentionnel de la tâche posturale sur les limites de la stabilité médio-latérales.....	38
Figure 7 : Coût attentionnel de la tâche cognitive pendant la tâche posturale.....	39

Liste des tableaux

Tableau 1 – Performances cognitives simple et double avec l’atteinte manuelle.....	32
Tableau 2 – Performances cognitives simple et double avec la tâche posturale.....	39

Listes des abréviations

CM : Centre de masse

COP : Centre de pression

RMS : Erreur quadratique moyenne

3D : tridimensionnel

AP : antéropostérieur

ML : Médio-latéral

Remerciements

D'abord Julie, qui s'est intéressée à ma discipline sportive lors de nos premières discussions. Il était nécessaire pour moi que ce projet de maîtrise soit en lien avec l'activité que j'ai le plus pratiquée dans les deux dernières décennies. Tu as été présente du début à la fin dans un contexte sanitaire assez particulier. Merci pour tes encouragements tout au long de ce projet et de ta contribution à l'élargissement de mes connaissances dont très peu ont l'occasion d'obtenir dans ce domaine sportif.

Marie-Julie, Kristina, Safwan, Manal et Raphaèle, merci à vous tous d'avoir contribué à l'acquisition des données des participants. Votre aide a été si précieuse afin de terminer ce projet dans un délai raisonnable. Et encore une fois, un projet qui a été réalisé dans un contexte difficile. Bonne continuité dans vos projets personnels et professionnels.

À toute ma famille, qui m'a encouragé à poursuivre mes études afin d'atteindre mon plein potentiel. Votre support et vos encouragements m'ont aussi permis de passer à travers toutes ses étapes académiques, une à la fois. Même si parfois vous n'aviez aucune idée de ce que je faisais (d'ailleurs, c'est sûrement encore le cas), vous avez été fiers de moi tout au long de ce parcours et j'en suis sincèrement reconnaissant.

Enfin, merci à mon amoureuse qui a été une présence rassurante tout au long de ces deux dernières années. Il s'agissait d'un long parcours au cours duquel tu m'as permis de franchir les différentes étapes de ce projet. Ta participation lors des tests pilotes a été d'un grand aide afin de faire avancer l'acquisition des données. Même si parfois tu avais hâte que je quitte mon ordinateur après plusieurs heures de travail consécutives (c'est probablement ce que tu te dis au moment où j'écris ces lignes), tu étais là à me dire de ne pas lâcher et que la fin approchait. Merci pour tout.

CHAPITRE 1 – Introduction

Si vous prenez la posture d'un joueur de golf et fermez vos yeux, vous savez si votre tronc est vertical ou incliné, si la position de vos bras et de vos genoux est étendue ou fléchie, si vos mains sont entièrement refermées sur le bâton et si elles sont immobiles ou en mouvement. Vous percevez également si votre poids est réparti également entre vos pieds. Lorsque vous vous apprêtez à effectuer votre élan, vous avez conscience de la position de tous les segments de votre corps. C'est alors que vous vous élancez et qu'à chaque instant, vous percevez l'étendue de votre mouvement vers l'arrière, puis vers l'avant, afin que le bâton frappe la balle avec la plus grande précision possible. Puis, si vous êtes un expert, lorsque vous voyez la trajectoire de votre balle, vous pouvez analyser le mouvement que vous venez tout juste d'effectuer afin de comprendre le résultat de votre trajectoire de balle. Cette remarquable capacité de percevoir, de contrôler et de mémoriser les mouvements de votre corps provient de ce que certains scientifiques nomment le sixième sens, c'est-à-dire la proprioception. La proprioception se définit comme la perception des positions et des déplacements des segments du corps les uns par rapport aux autres sans l'aide de la vision (Stillman, 2002). Le contrôle des actions motrices complexes de la vie quotidienne, par exemple, l'exécution d'atteintes manuelles multi articulaires et la stabilité posturale dynamique requièrent un niveau élevé d'acuités proprioceptives (Han et al. 2014; Jacobs et Horak 2006; Messier et al. 2003). La précision des sensations proprioceptives est également un déterminant majeur de la performance sportive (Hrysomallis, 2011; Han et al. 2015; Han et al. 2015).

Le golf est une discipline sportive qui nécessite l'intégration d'informations visuelles, vestibulaires, et proprioceptives. Le niveau de performance dans cette discipline dépend, de façon importante, d'une séquence précise et coordonnée de mouvements des membres supérieurs, du tronc et des membres inférieurs ainsi que de la qualité de la stabilité posturale lors du transfert de poids (élan). Plusieurs recherches ont démontré que l'habileté de coordonner des mouvements multiarticulaires et des postures précises dépend prioritairement des sensations proprioceptives (Sainburg et al. 1993; Peterka, 2002; Messier et al. 2003; Jacobs et Horak, 2006). Une étude récente a indiqué que le joueur de golf de haut niveau dépend moins des informations visuelles que le joueur non expert (Micarelli et al. 2019). Ce résultat suggère indirectement que la contribution des informations proprioceptives au geste technique du joueur de golf expert est plus importante que chez le joueur non expert.

Certaines études récentes suggèrent que l'acuité des sensations proprioceptives est supérieure chez les athlètes d'élite en comparaison à des participants témoins non-athlètes (Muaidi et al. 2009; Han et al. 2015). Nous disposons cependant de peu de données sur les habiletés proprioceptives de l'athlète élite. De plus, les études conduites jusqu'à ce jour rapportent des résultats divergents. Des recherches antérieures ont exploré la proprioception chez des athlètes provenant de diverses disciplines sportives. Certaines ont confirmé la supériorité proprioceptive des athlètes, tandis que d'autres n'ont trouvé aucune différence significative entre les athlètes et les non-athlètes (Nodehi-Moghadam et al. 2013; Sahin et al. 2015; Han et al. 2015). Les conclusions divergentes retrouvées dans la littérature portant sur la performance proprioceptive de l'athlète pourraient être expliquées, en partie, par la grande variété des protocoles expérimentaux utilisés pour évaluer la proprioception, par la diversité des disciplines sportives qui ont été considérées ainsi que par la variabilité dans le niveau d'entraînement des athlètes qui ont été testés.

Au cours de la dernière décennie, plusieurs études ont montré que le contrôle du mouvement et de la posture comporte une demande attentionnelle (Goble et al. 2011; Boigontier et al. 2013; Sirois-Leclerc et al. 2017). De façon importante, de récentes études ont proposé que le traitement des informations proprioceptives mobilise également des ressources attentionnelles (Yasuda et al. 2014). De plus, la demande attentionnelle de la stabilité posturale et du traitement de la proprioception serait plus élevée lorsque l'acuité des sensations proprioceptives est réduite, par exemple lors du vieillissement normal ou lors d'une maladie neurologique (Boisgontier et al. 2013; Henry et Baudry 2019). Cependant, une question reste encore ouverte : est-ce que la demande attentionnelle du traitement des informations proprioceptives et du contrôle postural est inférieure lorsque l'acuité des sensations proprioceptives est plus élevée comme chez l'athlète?

Dans le cadre de cette recherche, nous voulions vérifier si le contrôle proprioceptif d'une tâche de mouvements de bras multi articulaires et d'une tâche posturale dynamique chez des golfeurs experts est plus précis et moins variable que chez les personnes sédentaires. Une autre question d'intérêt est de savoir si le contrôle proprioceptif de ces deux tâches motrices complexes fait intervenir une demande attentionnelle moins élevée chez les golfeurs élités comparativement à des personnes sédentaires.

Aucune étude n'a jusqu'à ce jour évalué les performances proprioceptives et attentionnelles d'athlètes élités en golf. Pour ce faire, nous avons testé la performance proprioceptive d'athlètes de

l'équipe de golf des Carabins de l'Université de Montréal et celle de non-athlètes sédentaires du même âge dans deux tâches motrices expérimentales qui comportent plusieurs aspects de la performance golfique. Tout d'abord, nous avons évalué la précision de mouvements de bras multi articulaires effectués dans l'espace tridimensionnel en raison du rôle clé de la proprioception dans le contrôle de la dynamique intersegmentaire et dans la compensation contre les forces gravitationnelles (Sainburg et al 1993; Messier, et al. 2003). Deuxièmement, étant donné que la proprioception joue un rôle critique dans la stabilité posturale dynamique (Jacobs et Horak, 2006; Peterka, 2002), nous avons évalué les limites de la stabilité posturale dans une condition dynamique qui simule les positions fonctionnelles qui se produisent dans plusieurs tâches de la vie quotidienne et dans plusieurs gestes sportifs, comme le coup d'approche au golf (Mancini et al. 2008; Blanchet et al. 2014). Ces deux tâches ont été effectuées dans la condition yeux fermés afin d'augmenter la demande proprioceptive. Les participants ont également effectué une tâche secondaire attentionnelle de soustraction mathématique ($n-3$). Les tâches motrices et la tâche attentionnelle ont été effectuées soit seule ou simultanément.

CHAPITRE 2 – Revue de littérature

Cette revue de la littérature sera organisée autour de six questions majeures : (1) Qu'est-ce que la proprioception? (2) Quel est le rôle de la proprioception dans le contrôle de l'atteinte manuelle et la stabilité posturale? (3) Comment mesurer la proprioception? (4) Est-ce que la proprioception de l'athlète d'élite est supérieure à celle des non-athlètes sédentaires? (5) Que savons-nous sur l'acuité des sensations proprioceptives des golfeurs? (6) Est-ce que le coût attentionnel de la performance sensorimotrice de l'athlète est inférieur à celui des non-athlètes sédentaires?

2.1 – Qu'est-ce que la proprioception ?

La proprioception représente la perception de la position et des mouvements des segments du corps les uns par rapport aux autres sans l'aide de la vision (Stillman, 2002; Goble et al. 2012; Taylor et al. 2013). Les informations proprioceptives sont essentielles au contrôle des mouvements volontaires et la stabilité posturale (Cordo, 1990; Blanchet et al. 2014). En outre, la proprioception joue un rôle prioritaire dans plusieurs fonctions d'ordre supérieur comme la construction d'une représentation interne ou le schéma du corps (Kawato et Wolpert, 1998).

Les informations proprioceptives proviennent des mécanorécepteurs musculaires, cutanés et articulaires (Riemann et Lephart, 2002; Goble et al. 2012). Ensemble, ces mécanorécepteurs fournissent des informations afférentes cruciales pour la coordination et la précision des mouvements qui impliquent plusieurs articulations ou multi articulaires (Cordo. 1990; Sainburg et al. 1993; Kawato, 1999; Messier et al. 2003). Cependant, les fuseaux neuromusculaires sont les principaux transducteurs pour recueillir l'information proprioceptive dirigée vers le système nerveux central afin de permettre la perception consciente et le contrôle en temps réel des positions et des mouvements des segments du corps (Proske et Gandevia, 2009; Proske et Gandevia, 2012). Les mécanorécepteurs cutanés et articulaires sont toutefois importants afin de déterminer les positions des segments distaux et pour signaler les positions articulaires extrêmes (Collins et Prochazka, 1996, Edin, 2001). Au cours des dernières décennies, plusieurs évidences ont également démontré la contribution significative des signaux centraux moteurs issus de la commande motrice (copie efférente ou décharge corollaire) aux sensations de position et de mouvement des segments du corps (Proske, 2006).

Nous savons aujourd’hui que les signaux afférents des récepteurs des muscles, des articulations et de la peau ainsi que les signaux efférents liés aux commandes motrices contribuent tous à la richesse des sensations proprioceptives (Taylor et al. 2013). L’information proprioceptive est largement distribuée à tous les étages du système nerveux. Par conséquent, les informations proprioceptives sont très étroitement reliées au système moteur. En effet, la proprioception influence le mouvement et en retour, le mouvement influence la proprioception. Malgré la grande interaction entre les sensations proprioceptives et le mouvement, plusieurs approches expérimentales ont permis d’identifier les rôles prioritaires de la proprioception dans la performance motrice.

2.2 – Quel est le rôle de la proprioception dans le contrôle de l’atteinte manuelle et la stabilité posturale?

2.2.1 – La contribution de la proprioception dans l’atteinte manuelle

Les mouvements d’atteintes manuelles dirigés vers des objets ou un but situé dans l’espace extra personnel représentent une importante composante des mouvements volontaires de l’humain. L’atteinte manuelle vers des cibles situées dans l’espace tridimensionnel est une tâche expérimentale pertinente afin d’étudier l’efficacité des mécanismes de traitement et d’intégration des informations sensorielles. En manipulant la nature des informations sensorielles (visuelles ou proprioceptives), qui définissent les positions de la cible et de la main, les chercheurs peuvent mesurer comment l’intégration de ces signaux affecte la précision spatiale des mouvements (Adamovich et al. 1998; Adamovich et al. 2001; Mongeon et al. 2009, Mongeon et al. 2015).

Une myriade d’études a souligné l’importance de la rétroaction proprioceptive dans le contrôle des mouvements volontaires. En particulier, les études qui ont examiné les conséquences d’une neuropathie sensitive démontrent que, lorsque la rétroaction visuelle est réduite ou indisponible, les individus souffrant d’une désafférentation proprioceptive montrent une détérioration substantielle dans plusieurs habiletés motrices (Goble et al. 2009). Alors que plusieurs recherches ont démontré une absence quasi complète de déficits dans le contrôle des mouvements monoarticulaires (Rothwell et al. 1982, Sanes, 1985, Forget et Lamarre 1987), des désordres marqués dans la précision et dans la coordination intersegmentaire ont été trouvés lors de tâches d’atteintes manuelles multi articulaires (Ghez et al. 1990,

Gordon et al. 1995, Sainburg et al. 1995, Messier et al. 2003). Ces observations ont suggéré que les signaux proprioceptifs jouent un rôle critique dans les complexités additionnelles qui émergent lors de l'exécution d'atteintes manuelles multi articulaires. Ensemble, ces études ont confirmé que la proprioception est essentielle pour le contrôle des moments de force intersegmentaires, pour la synchronisation des mouvements produits aux articulations adjacentes ainsi que pour la production de compensations adaptées à la force gravitationnelle.

En somme, les études conduites à ce jour indiquent que les mouvements d'atteintes manuelles multi articulaires dirigés vers des cibles situées dans l'espace tridimensionnel présentent des exigences élevées pour le traitement et l'intégration des informations proprioceptives. Ces résultats suggèrent que ce paradigme expérimental pourrait s'avérer une approche sensible pour évaluer les habiletés proprioceptives chez plusieurs populations. Dans cette perspective, cette approche a été utilisée chez des patients souffrant de la maladie de Parkinson. Ces études ont montré que, lorsque la cible et/ou la main sont définies sur la base unique d'informations proprioceptives, les patients atteints de Parkinson montrent une détérioration significative de la précision finale des mouvements (Adamovich et al. 2001; Mongeon et al. 2009; Cosgrove et al. 2021). Ces recherches ont donc permis de mettre en lumière les désordres proprioceptifs de cette population. Cependant, à notre connaissance, ce paradigme expérimental n'a jamais été utilisé pour évaluer la sensibilité proprioceptive des membres supérieurs chez les athlètes élités.

2.2.2 – La contribution de la proprioception dans le contrôle postural

La stabilité posturale se définit comme étant la capacité de maintenir l'équilibre dans des conditions à la fois statique et dynamique sans perturbation (Van Wegen et al. 2002; Winter et al. 1998), en réponse à des perturbations posturales externes ou internes (Jacobs et al. 2005; Patton et al. 1999) ou lors de la préparation posturale à des mouvements volontaires (Hass et al. 2005; Rocchi et al. 2006).

Le défi biomécanique le plus grand pour assurer la stabilité posturale est la capacité de maintenir la projection du centre de masse (CM) à l'intérieur de la base de support, qui elle, est délimitée par les bords externes des pieds. Le centre de pression (COP) est le point d'application du vecteur de la force de réaction verticale et consiste en la moyenne pondérée de l'ensemble des pressions sur la surface de contact au sol (Winter et al. 1998). En position statique, les limites de la stabilité posturale représentent

l'aire au-dessus de laquelle un individu peut déplacer son COP et maintenir son équilibre sans changer la base de support (Jacobs et Horak, 2006). Le système nerveux central dispose d'une représentation de ces limites de la stabilité posturale qui est utilisée afin de déterminer comment effectuer des mouvements tout en préservant l'équilibre.

Une approche sensible pour quantifier la stabilité posturale est de mesurer les limites de la stabilité posturale en condition dynamique, c'est-à-dire lorsqu'un individu effectue un mouvement volontaire d'inclinaison maximale du corps dans une direction donnée, en gardant ses pieds ancrés au sol sans chuter (Jacobs et al. 2005). La différence entre la position maximale du centre de pression suivant l'inclinaison du corps dans une direction donnée et la position initiale du sujet représente la limite de la stabilité posturale. Dans cette perspective, le contrôle postural représente donc la capacité d'un sujet à maintenir son COP près de ses limites posturales sans perdre l'équilibre (Newton 2001).

La perception des limites de la stabilité posturale est un aspect crucial de l'efficacité du contrôle postural. Ce mécanisme implique le traitement et l'intégration d'informations sensorielles multimodales incluant les informations tactiles, proprioceptives, visuelles et vestibulaires (Fitzpatrick and McCloskey 1994). Étant donné que les seuils de perception des oscillations corporelles par les propriocepteurs des membres inférieurs sont très bas en position debout en comparaison aux systèmes visuel et vestibulaire, les signaux proprioceptifs jouent un rôle prioritaire dans le contrôle postural (Doumas et al. 2008; Speers et al. 2002; Teasdale et Simoneau 2001).

De nombreux protocoles permettant de varier la disponibilité des informations visuelles et/ou de perturber la proprioception par la vibration tendineuse ont permis de souligner le rôle critique de la proprioception dans la stabilité posturale statique et dynamique (Blanchet et al. 2014; Baudry et Duchateau, 2020). De façon similaire à l'atteinte manuelle, la contribution significative des informations proprioceptives à la stabilité posturale a été pointée par les études qui ont démontré les conséquences dramatiques d'une désafférentation proprioceptive sur le maintien de l'équilibre statique et dynamique (Jacobs et Horak, 2006; Tagliabue et al. 2009; Schaffer et al. 2021).

Certaines études menées chez les personnes âgées en santé et les personnes souffrant des maladies de Parkinson et de Huntington ont suggéré qu'une détérioration du traitement des informations proprioceptives au cours du vieillissement normal ou d'une pathologie neurologique entraîne une réduction significative des limites de la stabilité posturale (Mancini et al. 2007; Blanchet et al. 2014; Vermette et al. 2022). Ensemble, ces études démontrent que l'évaluation des limites de la stabilité posturale, tout particulièrement dans une condition « yeux fermés », est une approche sensible et efficace

pour évaluer l'habileté d'utiliser les informations proprioceptives pour le contrôle de la stabilité posturale chez diverses populations. Cependant, aucune étude à ce jour n'a évalué si les limites de la stabilité posturale des athlètes élités sont supérieures aux jeunes adultes en santé du même âge.

2.3 – Comment mesurer les sensations proprioceptives?

Différentes techniques permettent de mesurer plus directement l'acuité des sensations proprioceptives, c'est-à-dire lors d'une tâche qui implique une contribution minimale du système moteur. Les trois techniques les plus utilisées sont le seuil de détection du mouvement passif (SDMP), la reproduction de la position articulaire (RPA) et la discrimination de l'étendue du mouvement actif (DÉMA) (Han et al. 2016). Ces méthodes mesurent différents aspects de la proprioception. Cette proposition est confortée par l'observation que les résultats à ces différents tests proprioceptifs ne sont pas nécessairement corrélés chez les mêmes individus pour une même articulation. (Horváth et al. 2023).

La technique SDMP mesure le seuil de détection d'un mouvement passif imposé à une articulation, par exemple à l'articulation du genou (Beynon et al. 1999) ou celle de l'épaule (Lephart et al. 1994), sans l'aide de la vision (Yasuda et al. 2014). Dans ces expérimentations, l'articulation du participant est passivement déplacée à une vitesse très lente par un appareillage motorisé. Le participant doit indiquer lorsqu'il détecte un mouvement. La différence entre la position de départ de l'articulation et sa position angulaire au moment où le participant détecte un mouvement, correspondant au seuil de détection du mouvement passif (Han et al. 2016). Plus ce seuil est bas, plus l'acuité proprioceptive est grande. La méthode SDMP a une validité écologique relative moindre parmi les trois méthodes présentées étant donné que le protocole s'éloigne des conditions d'utilisation de la proprioception dans la vie quotidienne. Cependant, elle présente une grande « pureté conceptuelle » compte tenu du relâchement préalable de la musculature sollicitée et du grand contrôle sur la contribution des autres sources d'information. En effet, étant donné qu'un appareil motorisé déplace l'articulation du participant passivement, cela permet de minimiser la contribution des informations efférentes (Elangovan et al. 2014).

La deuxième technique mesure la capacité de reproduire un angle articulaire cible, soit avec l'articulation ipsilatérale (RPAi) ou l'articulation controlatérale (RPAc). Dans ce protocole, l'expérimentateur (ou un appareillage motorisé) déplace l'articulation du participant à un angle cible puis ramène l'articulation à sa position initiale de départ. Ensuite, on demande aux sujets de reproduire la

position angulaire cible. Plus l'erreur de reproduction de l'angle cible est petite, plus l'acuité proprioceptive est grande. Il a été avancé que les protocoles RPA ont une plus faible validité écologique, car les conditions de test sont si différentes du fonctionnement normal qu'elles contribuent peu à comprendre le rôle que joue la proprioception dans les activités quotidiennes et sportives. En revanche, cette méthode permet l'exploration des asymétries hémisphériques (RPAC) dans les capacités sensorimotrices (Laszlo, 1992).

La troisième technique mesure la capacité de discriminer l'étendue d'un mouvement actif (DÉMA). Dans ce protocole, l'expérimentateur ou un appareillage motorisé déplace l'articulation du participant vers plusieurs angles cibles mémorisés lors d'une phase de familiarisation. Ensuite, le participant est positionné à un des angles cibles de façon aléatoire et doit retourner activement à la position initiale. Il doit ensuite mentionner à quelle position cible cela faisait référence. Afin de mesurer l'acuité proprioceptive, les chercheurs ont calculé le pourcentage de bons jugements sur le nombre total des essais effectués durant l'expérience. Plus le nombre de bons jugements était élevé, plus l'acuité proprioceptive était grande. La méthode de test AMEDA est généralement considérée comme une méthode présentant une plus grande validité écologique, puisque cette méthode implique la discrimination proprioceptive dans le contexte de mouvements actifs. On considère donc qu'elle reflète davantage l'utilisation des informations proprioceptives dans les situations fonctionnelles qui se produisent dans la plupart des activités motrices quotidiennes, du travail et des sports (Han et al. 2016).

Ces trois techniques ont été largement utilisées dans la littérature afin d'évaluer l'acuité proprioceptive de diverses populations. En outre, ces techniques ont permis d'évaluer la précision des sensations proprioceptives chez les athlètes d'élite (Lephart et al. 1994; Beynnon et al. 1999; Janwantanakul et al. 2001; Willems et al. 2002; Cameron et Adams, 2003; Larsen et al. 2005; Symes et al. 2010; Yasuda et al. 2014; Han et al. 2015).

2.4 – Est-ce que la proprioception de l'athlète d'élite est supérieure?

La performance de l'athlète nécessite un contrôle neuromusculaire précis, une conscience corporelle appropriée ainsi qu'une habileté élevée à synchroniser les mouvements à plusieurs articulations afin d'exceller dans leur sport. De plus, les athlètes de la majorité des disciplines sportives doivent coordonner des séquences de mouvements complexes tout en maintenant leur équilibre postural. Au

cours des dernières années, certaines recherches ont démontré que les personnes physiquement actives présentent une plus grande acuité proprioceptive en comparaison aux personnes sédentaires (Glofcheskie et Brown, 2017; Han et al. 2015; Muaidi et al. 2009). Dans cette perspective, il est possible que les athlètes élités démontrent de plus grandes habiletés proprioceptives que les non-athlètes sédentaires en raison de leur haut niveau d'entraînement physique comportant des gestes techniques répétitifs (Allegruci et al. 1995).

La littérature comporte plusieurs études récentes sur la proprioception de l'athlète dans une variété de disciplines sportives (Han et al. 2015; Sahin et al. 2015; Muaidi et al. 2009). Ces études présentent une perspective intéressante sur les habiletés proprioceptives de l'athlète à différentes articulations et dans diverses tâches posturales. Une étude de Muaidi et al. (2009) a évalué la capacité à détecter la position articulaire du genou chez des joueurs de soccer olympiques en comparaison à des sujets témoins non-athlètes sédentaires. Il s'agissait d'une tâche de jugement de l'angle articulaire au genou alors que les participants devaient effectuer une rotation active de leur genou afin d'associer la position articulaire à l'un des quatre angles préalablement présentés sans vision. L'acuité proprioceptive de l'articulation du genou des athlètes de soccer était supérieure à celle du groupe témoin. Cependant, cette étude ne permettait pas de déterminer si les meilleures performances des joueurs de soccer élités étaient prioritairement expliquées par le bagage génétique prédestiné à une meilleure acuité proprioceptive ou si ces meilleures performances étaient largement le résultat des adaptations périphériques et centrales du système de traitement des informations proprioceptives qui prennent place au cours l'entraînement (Lephart et al. 1996).

Une étude menée par Sahin et al. (2015) a montré des tendances similaires lors de l'évaluation de la proprioception du genou chez des joueuses de volleyball à l'aide d'un dynamomètre *Biodex*. Il s'agissait de mouvements passifs et actifs d'extension du genou à 60 et 20 degrés sans vision. Dans l'ensemble, mais plus spécifiquement à l'angle de 60 degrés, les joueuses de volleyball étaient significativement meilleures que les sujets témoins lors de la tâche proprioceptive passive et active. Ce résultat pourrait s'expliquer par le fait que l'angle maximal des genoux lors des sauts et des atterrissages varie entre 55 et 65 degrés (Sinsurin et al. 2013). Ce faisant, les joueuses de volleyball seraient plus familières avec la proprioception articulaire au genou à 60 degrés. En revanche, les résultats de l'analyse posturale n'ont montré aucune différence significative entre les athlètes et les contrôles sédentaires. Malgré la petite taille de l'échantillon de joueuses (n=19), ces données contribuent à renforcer l'hypothèse selon laquelle l'entraînement spécifique à un sport peut rehausser l'acuité proprioceptive aux articulations qui sont très sollicitées

durant la pratique (Sahin et al. 2015). Cette amélioration sélective de la proprioception aux angles sollicités durant l'activité supporte l'idée que les meilleures performances proprioceptives des athlètes ne sont pas entièrement déterminées par la génétique.

Bien qu'une meilleure acuité proprioceptive chez les athlètes soit de plus en plus documentée, on ne sait pas si la capacité proprioceptive supérieure des athlètes est une conséquence des années d'entraînement spécifique au sport ou si des facteurs génétiques expliquent prioritairement ces performances. L'étude de Han et al. (2015) a étudié cette question avec des athlètes de plusieurs disciplines sportives (gymnastique, natation, badminton, soccer) de niveau national. Ils ont utilisé une tâche de type DÉMA à la cheville, au genou, à la colonne vertébrale, à l'épaule et au niveau des doigts. Des analyses corrélationnelles ont été effectuées afin d'évaluer la relation entre les indices d'acuité proprioceptive, le niveau de compétition sportive, les années d'entraînement spécifique au sport, l'âge, la taille et la masse corporelle. Les résultats ont démontré que l'acuité proprioceptive au niveau des cinq articulations, pour tous les groupes sportifs, était meilleure chez les athlètes que chez les personnes qui ne pratiquaient aucun sport de compétition.

Ce résultat est contradictoire avec les données qui démontrent que l'amélioration de la fonction proprioceptive est associée à des changements du système sensorimoteur spécifiques aux articulations entraînées (Jacobs et Horak, 2007; Brauer et al. 2002, Diener et al. 1988). La petite taille de l'échantillon et la sensibilité des mesures et des analyses utilisées peuvent avoir contribué à diminuer la probabilité d'observer de petites différences. Ces facteurs sont très importants à considérer dans le contexte de futures études, puisque de petites différences de temps ou de précisions permettent souvent de distinguer les vainqueurs des perdants dans le cadre d'une compétition sportive. Par ailleurs, il apparaît vraisemblable que la génétique et le niveau d'entraînement contribuent tous les deux à la performance proprioceptive. Déterminer les contributions respectives de la génétique et de l'entraînement sur les habiletés proprioceptives comporte de grands enjeux pour la réadaptation sensorimotrice et la performance de très haut niveau. Ensemble, les données actuelles soulignent la pertinence de continuer la recherche afin de mieux comprendre l'acuité proprioceptive.

2.5 – Que savons-nous sur la proprioception du golfeur?

Le golfeur nécessite une précision hors pair pour diriger la tête du bâton afin de frapper la balle avec une grande efficacité (Sweeney et al. 2013). Cela fait de l'élan complet une tâche de visée coordonnée afin de prédire le moment de collision de la tête du bâton avec la balle avec un degré de précision extrêmement élevé (Bishop et al. 2017). Les mouvements de golf impliquent la coordination précise de plusieurs segments du corps, notamment des membres supérieurs, du tronc et des membres inférieurs pour exécuter l'élan tout en conservant les yeux rivés sur la balle. Une étude sur le contrôle postural a suggéré que les golfeurs dépendent moins des informations visuelles pour effectuer des mouvements précis pluriarticulaires (Micarelli et al. 2019). Ce résultat suggère indirectement que la contribution des informations proprioceptives au geste golfique est importante. Cependant, aucune étude n'a jusqu'à ce jour évalué la performance proprioceptive des golfeurs élites.

2.5.1 – Contrôle postural chez les golfeurs

Lors de l'exécution d'un élan, les golfeurs doivent maintenir une bonne stabilité posturale. Une étude biomécanique a démontré que de grands changements dans la répartition du poids pendant un cycle d'élan entre la jambe avant et arrière (axe médio-latéral) peuvent améliorer le contrôle de l'équilibre des pratiquants (Okuda et al. 2002; Tsang et Hui-Chan, 2004). Ces chercheurs ont suggéré que l'entraînement du transfert de poids, simultanément à des mouvements d'amplitude variable des bras, pourrait améliorer l'équilibre postural des joueurs de golf experts en comparaison à des non-athlètes.

Afin de maintenir une bonne stabilité posturale, les golfeurs experts doivent également contrôler l'activation de la musculature du tronc afin de générer un élan répétable. Gkofcheskie et Brown (2017) ont étudié le contrôle postural du tronc chez des golfeurs universitaires. Les participants devaient maintenir l'équilibre de leur tronc à la verticale en position assise durant une minute. La stabilité posturale assise était analysée à l'aide d'une plateforme de force mesurant le déplacement du COP dans les directions antéropostérieure (AP) et médio-latérale (ML). Les golfeurs ont démontré des déplacements du COP le long des axes AP et ML significativement inférieurs aux sujets témoins. Ces résultats indiquent que les golfeurs ont un meilleur contrôle de leur tronc que des témoins sains non-athlètes. Étant donné que le golf est un sport qui implique de nombreuses répétitions et que la mobilisation du tronc est un aspect clé

de la performance golfique, le positionnement et la correction précise de l'angle du tronc durant le mouvement est une composante importante de l'entraînement du golfeur. Cette tâche d'équilibre nécessite l'intégration des signaux proprioceptifs du tronc afin de maintenir une position assise stable. Dans cette perspective, il est possible que la capacité des golfeurs à détecter la position de leur tronc soit plus élevée chez les golfeurs élités. Cependant, cette étude n'a pas évalué directement les habiletés proprioceptives des golfeurs.

Une étude de Micarelli et al. (2019) a utilisé un protocole d'équilibre statique durant lequel de jeunes golfeurs devaient maintenir une position verticale durant 60 secondes avec et sans vision sur une plateforme rigide ou tapissée de mousse (standardisée pour la *posturographie* statique). Les déplacements du COP ont été quantifiés et comparés entre les différentes conditions. Les déplacements du COP des golfeurs experts étaient significativement moins importants que ceux des golfeurs non experts et des sujets témoins non-athlètes dans la condition yeux fermés. Ce résultat supporte l'idée que le contrôle proprioceptif de la posture est plus précis chez les golfeurs experts.

2.6 – Est-ce que la demande attentionnelle de la performance sensorimotrice de l'athlète est inférieure à celles des non-athlètes sédentaires?

La vie quotidienne et le sport comportent de nombreuses situations au cours desquelles une première tâche motrice est effectuée simultanément à une seconde tâche motrice ou cognitive. De façon générale, ces situations de double tâche ne représentent pas un problème puisqu'elles n'interfèrent pas avec la performance à l'une ou à l'autre de ces tâches. Il a été suggéré que la capacité d'effectuer deux tâches simultanément est possible seulement si l'une de ces deux tâches est effectuée de façon automatique et requiert très peu de ressources attentionnelles (Boisgontier et al. 2013).

Traditionnellement, nous considérons que les jeunes adultes en santé pouvaient effectuer la majorité des actions motrices, tout particulièrement durant le maintien de la stabilité posturale et la marche sans la mobilisation de ressources attentionnelles (Woollacott et Shumway-Cook, 2002; Boisgontier et al. 2013). Cependant, au cours des deux dernières décennies, de nombreuses études ont démontré que la plupart des activités motrices mobilisent une proportion des ressources attentionnelles (Woollacott et Shumway-Cook, 2002; Yogeve-Seligmann et al. 2008). En outre, cette littérature indique que l'implication

de ressources cognitives et attentionnelles varie grandement en fonction de l'âge des individus et de la complexité de la tâche à accomplir.

Dans le cadre de cette recherche, nous nous sommes concentrés sur la définition de l'attention de Woollacott se définissant comme la capacité de traitement de l'information de l'individu (Woollacott et Shumway-Cook, 2002). Une hypothèse encore actuelle est que cette capacité de traitement de l'information est limitée pour un individu donné. L'exécution d'une tâche motrice particulière utiliserait donc une proportion de la capacité totale de traitement d'un l'individu ou, en d'autres termes, une proportion de ses ressources attentionnelles. Ainsi, lors de la réalisation de deux tâches effectuées simultanément, si la demande attentionnelle combinée de ces deux tâches dépasse la capacité totale d'un individu, la performance à l'une ou l'autre de ces deux tâches ou encore à ces deux tâches se détériore (Shumway-Cook et Woollacott, 2000; Woollacott et Shumway-Cook, 2002). Dans cette perspective, le paradigme de double tâche, durant lequel on demande à des participants d'effectuer une tâche primaire seule (condition de tâche simple) ou simultanément à une tâche secondaire (condition de tâche double), est une approche puissante pour étudier les ressources attentionnelles mobilisées par différentes populations dans une variété de contextes présentant différentes exigences pour le système sensorimoteur (Boisgontier et al. 2013; Salihu et al. 2022). Le coût attentionnel est une mesure du degré du déclin de la performance entre la condition de tâche simple et la condition de tâche double pour un individu donné. Cette mesure reflète donc le degré des ressources cognitives dirigées soit vers la tâche primaire (atteinte manuelle ou posture) ou la tâche secondaire cognitive (Li et al. 2018).

Afin de contrôler le mouvement et la posture, le système nerveux central doit traiter les informations sensorielles pour développer des commandes motrices et continuellement ajuster les mouvements des segments du corps (Mergner et Rosemeier, 1998). Le contrôle de la stabilité posturale peut être décrit selon un continuum allant du traitement entièrement « contrôlé » à un traitement entièrement « automatique ». Le niveau supérieur, représentant le traitement contrôlé, mobilise un maximum de ressources attentionnelles conscientes et fait intervenir prioritairement les structures corticales et les ganglions de la base afin d'adapter la réponse posturale au contexte. Quant à lui, le niveau inférieur, représentant le traitement automatique, mobilise un minimum de ressources attentionnelles et fait intervenir principalement les synergies du tronc cérébral et de la moelle épinière (Schneider et Shiffrin, 1977; Schneider et Chein, 2003, Glover, 2005; Jacobs et Horak, 2007; Honeycutt et al. 2009; Boisgontier et al. 2013). Au niveau supérieur, les ajustements posturaux volontaires sont guidés, par exemple, par l'intention d'une personne de demeurer le plus immobile possible. En contrepartie, le niveau inférieur de

contrôle est représenté par les microajustements automatiques continuellement effectués par un individu de façon inconsciente (Stins et Beek, 2012).

Dans cette perspective, le paradigme de double tâche permet d'analyser les ressources attentionnelles allouées à une tâche ou d'évaluer le degré d'automatisation de cette tâche (Della Sala et al. 1995; Schneider et Shiffrin, 1977). Plusieurs recherches se sont intéressées aux ressources attentionnelles investies dans le contrôle du mouvement et de la posture (Boigontier et al. 2013; Henry et Baudry, 2019; Salihi et al. 2022). Ces études ont cherché à comprendre comment le ratio des traitements contrôlé et automatique se modifie chez différentes populations dans différents contextes expérimentaux.

De nombreuses études ont évalué la demande attentionnelle du contrôle postural du jeune adulte en santé et de la personne âgée. Ces études ont utilisé des paradigmes de double tâche impliquant une tâche primaire posturale et une tâche secondaire cognitive. Elles ont démontré que la contribution des ressources cognitives et attentionnelles à la stabilité posturale des personnes âgées est plus élevée que celle des jeunes adultes, tout particulièrement lorsque les exigences de la tâche posturale et de la tâche cognitive sont élevées (Salihi et al. 2022). Ces chercheurs ont proposé que la capacité totale de traitement d'une personne évolue au cours de la vie (Ruffieux et al. 2015). Chez la personne âgée, cette capacité totale décline par rapport aux jeunes adultes. De plus, lorsque l'attention doit être divisée entre deux tâches simultanées, les personnes âgées auraient plus de difficulté à allouer les ressources disponibles de façon optimale. Ensemble, ces recherches antérieures suggèrent que le coût attentionnel de la performance motrice est plus élevé chez les personnes âgées en santé ou atteintes d'une pathologie neurologique (Shaefer, 2014; Granacher et al. 2011). De surcroît, la demande attentionnelle des aînés serait plus élevée en l'absence de vision, c'est-à-dire lorsque la stabilité posturale dépend prioritairement de l'intégration des informations proprioceptives (Henry et Baudry, 2019; Vermette et al. 2022).

À notre connaissance, seulement deux études ont évalué la demande attentionnelle du traitement des informations proprioceptives chez les jeunes adultes. Une première étude a porté sur le membre supérieur de jeunes adultes et de personnes âgées en santé. Les chercheurs ont utilisé une tâche d'appariement à plusieurs angles au coude. Cette dernière devait être effectuée simultanément à une tâche secondaire attentionnelle (Goble et al. 2011). Les participants étaient divisés en trois groupes. Les jeunes adultes, les personnes âgées avec et sans difficulté mnémonique. Les jeunes adultes ont obtenu des erreurs d'appariement plus petites que les aînés en condition de tâche simple. Lors de la double tâche, les jeunes adultes et les personnes âgées sans difficulté mnémonique ont augmenté légèrement leurs imprécisions spatiales, mais significativement moins que le groupe de personnes âgées avec difficultés

mnémoniques. Cette étude est l'une des premières à suggérer que la mémoire des informations proprioceptives concernant la position de la cible partage un substrat neuronal commun avec les ressources cognitives et attentionnelles qui permettent d'encoder, de manipuler et de se rappeler de chiffres. Ces résultats indiquent également que l'évaluation des habiletés proprioceptives par l'utilisation d'une tâche d'appariement implique des ressources attentionnelles. Cependant, cette tâche d'appariement monoarticulaire au coude n'était pas suffisamment sensible afin de révéler une réduction significative de la performance proprioceptive des jeunes adultes et des personnes âgées en santé qui ne présentaient pas de difficultés mnémoniques.

Une autre étude a investigué la contribution des ressources attentionnelles lors de l'exécution d'une tâche proprioceptive d'appariement de position angulaire à l'articulation de la cheville (Yasuda et al. 2014). Ces chercheurs ont utilisé une tâche cognitive secondaire de soustraction mathématique présentant deux niveaux de difficulté. La tâche facile était de soustraire 3 à un nombre à deux chiffres au hasard durant douze secondes (4 soustractions) pendant la phase d'encodage de l'angle à reproduire. Dans la tâche plus difficile, les participants devaient soustraire 7 d'un nombre de deux chiffres durant douze secondes (12 soustractions) pendant la phase d'encodage. Les résultats ont montré que les participants faisaient de plus grandes erreurs d'appariement dans la condition de tâche double en comparaison à la condition de tâche simple, mais seulement lorsque la tâche secondaire était difficile. Ces résultats supportent l'hypothèse selon laquelle l'allocation des ressources attentionnelles à une tâche secondaire cognitive peut compromettre la performance proprioceptive des jeunes adultes en santé. En outre, cette étude est la première à démontrer que le traitement des informations proprioceptives demande de l'attention.

Une question importante demeure encore ouverte : est-ce que le coût attentionnel du contrôle sensorimoteur et du traitement des informations proprioceptives est diminué chez les athlètes élités qui présentent souvent une acuité proprioceptive supérieure?

2.6.1 – Est-ce que le coût attentionnel de la performance sensorimotrice de l'athlète est inférieur à celui des non-athlètes sédentaires?

À notre connaissance, une seule étude a évalué de façon systématique la demande attentionnelle de la performance sensorimotrice de l'athlète élite (Sirois-Leclerc et al. 2017). Cette étude non interventionnelle a évalué la performance posturale de danseurs contemporains expérimentés en

comparaison à des sujets physiquement actifs, mais non danseurs. Les chercheurs ont utilisé une tâche posturale dynamique combinée à des tâches attentionnelles secondaires : une tâche facile de temps de réaction simple et une tâche difficile de temps de réaction au choix. Les participants étaient debout sur une plateforme de force le regard dirigé vers un écran qui représentait simultanément leur base de support, leur centre de pression et une cible à atteindre. La vision de leurs appuis était indisponible. Les participants devaient déplacer leur COP afin de suivre le plus précisément possible la cible en mouvement. Simultanément à cette tâche posturale, les participants devaient donner une réponse verbale lorsqu'ils entendaient un stimulus auditif grave (*TOP*) durant la tâche de réaction simple et *TY* (aigu) ou *TOE* (grave) durant la tâche de réaction au choix. Dans les conditions de tâche simple et de tâche double facile, les danseurs ont démontré une meilleure capacité à contrôler les mouvements de leur COP le long des axes antéropostérieur (AP) et médio-latéral (ML) par rapport aux non-danseurs. Ces résultats ont suggéré que la pratique spécialisée en danse, impliquant le contrôle de la posture et de l'équilibre, a augmenté leur performance en double tâche. Une performance supérieure en condition de double tâche a également été suggérée chez les joueurs élites de baseball (adolescents novices vs experts) (Gray, 2004), de soccer (adolescentes novices vs expertes) (Smith et Chamberlin, 1992) et les tireurs (jeunes adultes vs Taekwondoïste) (Negahban et al. 2013). Cependant, ces études ne comportaient pas d'évaluation de la performance cognitive. Il était donc impossible de calculer le coût attentionnel de la tâche cognitive. Ceci est essentiel afin d'évaluer les stratégies de contrôle utilisées afin de s'adapter à des situations complexes. De plus, ces études ne cherchaient pas à évaluer la performance proprioceptive des athlètes élites.

À notre connaissance, aucune étude n'a évalué la demande attentionnelle de la performance motrice et proprioceptive des golfeurs élites. Le golf est une activité sportive complexe pratiquée par les jeunes adultes et les personnes âgées. Cette activité comporte des exigences physiques et cognitives élevées sollicitant l'intégration sensorielle et la proprioception. La performance golfique nécessite la coordination précise entre les mouvements des membres supérieurs, du tronc et des membres inférieurs tout en maintenant un haut au niveau de stabilité posturale. Dans cette perspective, investiguer si la pratique du golf augmente la performance proprioceptive et diminue la demande attentionnelle de la performance motrice comporte de nombreuses implications pour l'entraînement des golfeurs novices et pour le maintien des habilités motrices et posturales de la personne âgée.

CHAPITRE 3 – Objectifs et hypothèses

3.1 – Objectifs

Le premier objectif de ce projet de recherche est d'investiguer le contrôle proprioceptif d'une tâche de mouvements de bras multi articulaires et d'une tâche posturale dynamique chez des golfeurs experts en comparaison à des personnes non-athlètes sédentaires. Le deuxième objectif est d'évaluer si le contrôle proprioceptif de ces deux tâches motrices complexes fait intervenir une demande attentionnelle moins élevée chez les athlètes élités en golf en comparaison à des personnes sédentaires. Pour ce faire, une tâche d'atteintes manuelles vers des cibles tridimensionnelles et une tâche de limites de la stabilité posturale ont été effectuées sans vision, soit seule ou simultanément à une tâche cognitive attentionnelle de soustraction mathématique.

3.2 – Hypothèses

1) Premièrement, étant donné que plusieurs études ont suggéré que les athlètes d'élite présentent une plus grande acuité proprioceptive que la population générale non active et que les joueurs de golf experts dépendent moins des informations visuelles que les non-experts, nous prédisons que les golfeurs élités montreront une plus grande précision et une variabilité spatiale inférieure aux non-athlètes sédentaires lors des atteintes manuelles vers des cibles proprioceptives. De plus, nous prédisons que les joueurs de golf de haut niveau montreront de plus grandes limites de la stabilité posturale que les non-athlètes sédentaires.

2) Deuxièmement, étant donné que la performance de haut niveau est généralement associée à une moins grande mobilisation des ressources attentionnelles, nous prédisons que la performance supérieure des joueurs de golf experts sera significativement moins affectée par l'ajout d'une tâche secondaire attentionnelle que celle des non-athlètes sédentaires.

CHAPITRE 4 – Méthodologie

4.1 – Participants

Quatorze golfeurs élités faisant partie de l'équipe de golf des Carabins de l'Université de Montréal (moyenne d'âge = 21,57 ; intervalle 19-25 ; 4 femmes et 10 hommes) et quatorze non-athlètes sédentaires d'âge comparable (moyenne d'âge = 23,57 ; intervalle 20-27 ; 8 femmes et 6 hommes) ont participé à cette étude après avoir donné leur consentement par la signature d'un formulaire approuvé par le comité d'éthique du Centre de recherche de l'institut de gériatrie (Numéro d'approbation : CER VN 21-22-19). Selon la classification de McKay et al. (2022), le niveau des golfeurs participants à cette recherche se situe dans le 3^e échelon sur une échelle 5 échelons (0,014% de la population globale), c'est-à-dire des athlètes ayant des entraînements structurés et périodiques leur permettant de faire des compétitions à un niveau national universitaire. Tous les participants devaient être en bonne santé générale sans problème de mobilité et sans avoir subi des blessures limitant leurs mouvements au niveau des membres supérieurs ou encore de blessures venant perturber leur stabilité posturale. Les participants étaient exclus s'ils présentaient des problèmes cognitifs ou de vision non corrigée. Les témoins ont été identifiés comme sédentaires en faisant moins de 150 minutes d'activité physique par semaine, critère qui a été validé avec un questionnaire standardisé sur la sédentarité (CSEP; Fowles et al. 2017). Les témoins ne devaient pas avoir d'antécédents sportifs (Nodehi-Moghadam et al. 2013) ou avoir participé à un entraînement régulier durant les 12 derniers mois (Sahin et al. 2015). Leur contribution était d'une seule session expérimentale d'environ 2 heures. Les golfeurs ont été recrutés grâce au réseau de connaissances de l'étudiant-chercheur dans l'équipe de golf de l'Université de Montréal. Les participants sédentaires ont été recrutés à l'aide d'une annonce publicitaire sur les réseaux sociaux et de bouche à oreille à travers les connaissances des membres du laboratoire.

4.2 – Tâche cognitive attentionnelle de soustraction mathématique

4.2.1 – Station expérimentale et procédures

La tâche cognitive attentionnelle consiste en une tâche continue de soustraction mathématique (n-3) à partir d'une liste préétablie à deux chiffres présentés dans un ordre aléatoire. Les participants devaient répondre à haute voix à une question de soustraction mathématique présentée toutes les deux secondes. Cette tâche attentionnelle secondaire était réalisée seule (tâche simple) en position assise sur une chaise (10 soustractions) ou simultanément (tâche double) à l'une des deux tâches motrices primaires. Dans la condition de tâche double, cette tâche cognitive était effectuée simultanément à l'une ou l'autre des tâches motrices primaires décrites plus loin. Étant donné que la durée d'un essai de nos deux tâches expérimentales était différente, nous avons établi un nombre de soustractions qui correspondait à la durée d'un essai pour chacune des deux tâches motrices. Notre objectif était d'occuper continuellement l'attention du participant durant le mouvement.

4.2.2 – Indices de performance

Chaque essai a été enregistré à l'aide d'un ordinateur PC et de la lecture à voix haute de l'application *Office Word*. Tous les essais ont ensuite été analysés afin de calculer le score de performance dans l'ensemble des conditions expérimentales, c'est-à-dire dans la condition de tâche simple et dans les conditions de tâche double lors des paradigmes d'atteintes manuelles et de stabilité posturale.

4.2.3 – Analyses de données

La formule suivante a été utilisée pour calculer le pourcentage de bonnes réponses mathématiques lors de la réalisation de la tâche attentionnelle de soustraction pour chacun des essais pour chacune des tâches motrices :

$$\frac{\text{Nombre de bonnes réponses}}{\text{Nombre de soustractions mathématiques}} \times 100$$

Durant la réalisation de la tâche, chaque bonne réponse donnée par le participant a été comptabilisée et divisée par le nombre total de bonnes réponses possibles pour chacun des essais (10 durant la tâche seule; 200 au total durant la tâche d'atteintes manuelles).

Afin de calculer le coût de la tâche cognitive attentionnelle, la formule suivante a été utilisée :

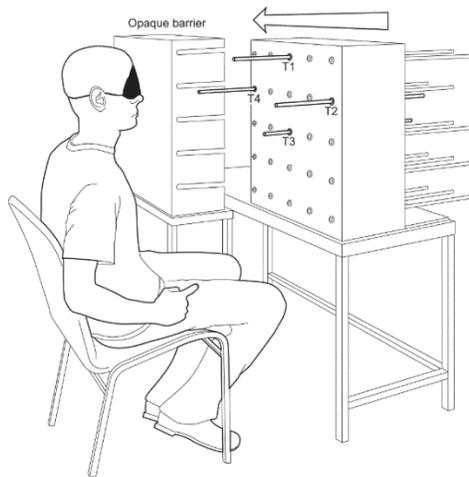
$$\frac{\text{Tâche cognitive simple} - \text{Tâche cognitive double}}{\text{Tâche cognitive simple}} \times 100$$

4.3 – Tâche d'atteinte manuelle dans un espace tridimensionnel

4.3.1 – Station expérimentale et procédures

L'atteinte manuelle est une tâche appropriée pour étudier le traitement et l'intégration des informations sensorielles, car il est possible de manipuler les modalités sensorielles définissant la position de la cible à atteindre et de la main du sujet afin d'observer le résultat sur la précision du mouvement. Les participants ont effectué des mouvements de bras vers différentes cibles 3D mémorisées. Ces mouvements ont été effectués dans la condition sans vision alors que la cible a été définie de façon proprioceptive. Pour ce faire, les participants étaient assis face à un dispositif en plexiglas (Figure 1) contenant vingt-cinq tiges en bois disposées en cinq rangées et cinq colonnes. Chacune de ces tiges peut être déplacée vers le sujet et ainsi constituer une cible potentielle à atteindre. Pour ce projet, quatre cibles différentes ont été utilisées et présentées au sujet selon une séquence aléatoire prédéterminée. Ils ont exécuté des mouvements d'atteintes manuelles vers ces cibles dans deux conditions : proprioceptive passive sans ou avec tâches cognitives (sans vision de la cible et de la main) (Mongeon et al. 2009).

Figure 1 – Protocole de la tâche d’atteintes manuelles 3D



Représentation schématique de la station expérimentale (tiré de Mongeon et al. 2009)

4.3.2 – Tâche d’atteintes manuelles

Dans cette condition, la vision de la cible et de la main est bloquée à tout moment en demandant au sujet de fermer les yeux. La position spatiale de la cible et de la main sont toutes deux détectées en utilisant uniquement la proprioception. L'expérimentateur guide la main droite du sujet vers la cible en tenant son coude et son poignet droits et en la maintenant pendant 10s dans cette position avec le bout du doigt de l'index touchant la cible pour enfin la ramener à la position de départ. Les participants doivent garder leur bras détendu, c'est-à-dire ne pas produire de force d'assistance ou de résistance pendant que leur bras est déplacé par l'expérimentateur (mouvement de référence passif). Immédiatement après ce mouvement de référence passif, ils effectuent une atteinte manuelle afin de reproduire le plus précisément possible la position de la cible mémorisée.

Un ensemble de données complet comprend 5 mouvements pour chacun des quatre emplacements cibles dans chaque condition sensorielle (20 essais dans chaque condition). Chaque condition sensorimotrice commence par une période de familiarisation au cours de laquelle les participants exécutent quelques mouvements vers des cibles différentes de celles utilisées dans la session expérimentale.

L'intervalle entre les essais successifs était d'environ 10s. Une pause de 5 minutes a été autorisée entre chaque condition. L'expérience entière durait environ 45 minutes. Les participants n'ont pas été

informés avant l'expérience que seuls quatre emplacements cibles ont été utilisés. Comme mentionné précédemment, le panneau de présentation des cibles pourrait servir de champ visuel structuré aidant les participants à localiser les cibles. Pour ajouter de l'incertitude et éviter tout apprentissage de la position spatiale des cibles tout au long de l'expérience, quatre cibles supplémentaires différentes (distracteur) ont été présentées tous les quatre essais entre des cibles expérimentales. Au total, cinq mouvements visant ces cibles « trompeuses » dans chaque condition sensorimotrice (un essai/cible) ont été réalisés. Seuls les mouvements visant des cibles expérimentales ont été analysés en détail (Mongeon et al. 2009 et 2015).

4.3.3 – Tâche d'atteintes manuelles avec tâche de soustraction de mathématique (n-3)

La tâche d'atteinte manuelle a également été effectuée simultanément à une tâche de soustraction mathématique (n-3) afin d'évaluer la demande attentionnelle des participants reliée à la tâche motrice. Cette tâche cognitive secondaire était introduite durant la phase d'encodage, c'est-à-dire durant le mouvement de référence passif alors que le participant devait enregistrer la position de la cible. Le participant devait répondre à 10 soustractions par essai. Une soustraction était demandée toutes les deux secondes. Lorsqu'une nouvelle soustraction était présentée, que la réponse soit bonne ou mauvaise, le sujet devait automatiquement répondre à la nouvelle soustraction. Le pourcentage de bonnes réponses a été évalué pour chacun des essais. Le déroulement de cette tâche a été inspiré de la recherche de Yasuda et ses collègues (2014). L'objectif de la tâche cognitive était d'occuper l'attention de façon continue sans nécessiter de demande mnémonique. Une étude antérieure menée dans notre laboratoire (Vermette et al. 2022) ainsi que des tests pilotes effectués en laboratoire nous ont permis de déterminer que la tâche cognitive de n-3 avec un intervalle de deux secondes est la plus appropriée dans le cadre de notre paradigme expérimental.

4.3.4 – Analyse de données

Pour suivre les mouvements du sujet, des diodes émettrices infrarouges (IRED) ont été placées sur le bout de l'index droit et sur l'épaule droite (processus acromial de l'omoplate). Les coordonnées spatiales 3D des diodes ont été échantillonnées à une fréquence de 200 Hz à l'aide d'un système d'analyse de mouvement (2 Optotrak® CertusT, Northern Digital, inc., Waterloo, Ontario, Canada). La série temporelle des coordonnées D.E.L. a ensuite été filtrée numériquement en utilisant un filtre Butterworth du second

ordre avec une fréquence de coupure de 8 Hz. Un logiciel d'analyse personnalisé (Matlab®, MathWorks, Inc.) a été utilisé pour afficher et traiter les essais des participants. Les emplacements cibles ont été mesurés en enregistrant les coordonnées spatiales des IRED avec le doigt sur la cible après la session expérimentale.

4.3.5 – Indices de performance

Pour comparer les performances des golfeurs élites à celles de non-athlètes sédentaires dans les différentes conditions sensorimotrices, les erreurs 3D absolues, les erreurs variables 3D et les erreurs de direction (direction, élévation et distance radiale) ont été calculées pour chacun des mouvements visant un emplacement cible dans un cadre de référence cartésien. Les erreurs absolues 3D ont été calculées comme la distance 3D dans l'espace entre la position du point final de l'index et la position de la cible. Elles nous fournissent une mesure sur la taille globale des erreurs commises lors de l'atteinte de chaque cible. L'erreur variable 3D a été calculée comme l'écart-type pour tous les essais à un emplacement cible donné. Cette valeur fournit une mesure sur la dispersion moyenne des positions finales du bout de l'index vers chacune des cibles (Messier et al. 2003).

Afin de calculer le coût attentionnel de la tâche cognitive sur les erreurs absolues et variables 3D, la formule suivante a été utilisée pour chacune des cibles :

$$\frac{\text{Atteinte manuelle avec tâche cognitive} - \text{Atteinte manuelle seule}}{\text{Atteinte manuelle seule}} \times 100$$

La donnée obtenue à partir de cette formule nous permet de vérifier si la performance motrice de la tâche d'atteintes manuelles 3D s'est améliorée (valeur négative) ou détériorée (valeur positive) en condition de double tâche.

4.4 – Tâche de la limite de la stabilité posturale

Les limites de la stabilité posturale ont été évaluées dans une condition dynamique qui simule les positions fonctionnelles qui se produisent dans plusieurs tâches de la vie quotidienne. Par exemple, le maintien du centre de pression près des limites antérieures ou postérieures de la base de sustentation simule l'initiation de la marche et la transition de la position assise à debout (Mancini et al. 2008; Blanchet et al. 2013). Il s'agit de situations où un contrôle postural précis est nécessaire afin d'éviter une chute.

4.4.1 – Station expérimentale et procédures

Limites de la stabilité posturale

Yeux fermés, les participants étaient debout pieds nus sur une plateforme de force (AMTI inc.). Ils devaient demeurer immobiles sur la plateforme pendant 30 secondes. Les bras placés en croix sur les épaules, ils devaient ensuite s'incliner le plus loin possible vers l'avant ou vers l'arrière (limites antéropostérieures), puis vers la droite ou vers la gauche (limites médio-latérales) sans lever les pieds et sans fléchir leur tronc. La position maximale devait être maintenue durant 10 secondes avant de revenir à la position initiale pour 30 secondes supplémentaires. La tâche était réalisée les yeux fermés. Un essai était effectué par direction (avant, arrière, gauche et droite) dans chaque condition pour un total de 4 essais.

Limites de la stabilité posturale avec tâche cognitive

La tâche posturale était également effectuée soit seule ou simultanément à la tâche attentionnelle de soustraction mathématique (n-3). Dans la condition de tâche double, la tâche attentionnelle était introduite tout juste avant l'inclinaison du corps et était continuellement effectuée, jusqu'au retour du participant à la position initiale. Le participant devait répondre à 15 soustractions mathématiques par essai. Une soustraction était demandée toutes les deux secondes. Lorsqu'une nouvelle soustraction était présentée, que la réponse soit bonne ou mauvaise, le sujet devait automatiquement répondre à la nouvelle soustraction. Le pourcentage de bonnes réponses a été évalué pour chacun des essais. La durée de l'expérimentation était d'une durée d'environ vingt minutes. Il y avait une pause de deux minutes entre chacune des conditions. Le logiciel de collecte de données utilisé était Balance Clinic. Entre chacun des participants, la plateforme était désinfectée.

4.4.2 – Analyse de données

Les données sur les forces de réaction verticales et horizontales au sol ont été recueillies à l'aide d'une plaque de force (AMTI inc.) à une fréquence d'échantillonnage de 200 Hz. La collecte de données et le traitement de celles-ci ont été effectués à l'aide du logiciel Balance Clinic (AMTI inc.). Afin de comparer les performances des golfeurs élités à des non-athlètes sédentaires, les excursions maximales du COP (limites de la stabilité) et les erreurs quadratiques moyennes du COP (RMS) ont été calculées pour les mouvements d'inclinaison dans chacune des directions dans les deux conditions sensorielles.

4.4.3 – Indices de performance

Limites de la stabilité

Les déplacements du centre de pression au cours des 10 secondes d'inclinaison à la position maximale ont été analysés pour caractériser les limites fonctionnelles de stabilité. L'amplitude totale des excursions maximales COP (c'est-à-dire les limites de la stabilité) des directions antéropostérieures et médio-latérales a été analysée. L'amplitude des excursions maximales du COP a été calculée comme la différence entre la moyenne du COP à l'état d'équilibre pendant la phase initiale et la moyenne du COP atteint lors de l'inclinaison maximale dans chacune des directions.

Afin de calculer le coût de la tâche cognitive sur les limites de la stabilité posturale durant l'inclinaison maximale, la formule suivante a été utilisée pour chacune des directions :

$$\frac{\text{Tâche posturale simple} - \text{Tâche posturale double}}{\text{Tâche posturale simple}} \times 100$$

La donnée obtenue à partir de cette formule nous permet de vérifier si les limites de la stabilité posturale se sont améliorées (limites = valeur négative) ou détériorées (limites = valeur positive) en condition de tâche double.

Erreur quadratique moyenne

Le RMS correspond à l'erreur standard du déplacement du COP durant l'inclinaison maximale. Le RMS a été calculé dans les quatre directions (avant, arrière, droite et gauche). Plus cette valeur est petite, meilleure est la stabilité du participant.

4.5 – Analyses statistiques

Pour tester la performance et le coût attentionnel de la tâche cognitive, nous avons calculé une ANOVA mixte à trois facteurs (2 groupes x 2 conditions cognitives x 4 cibles) pour chacune de ses variables.

Pour tester l'effet de la condition attentionnelle sur les erreurs absolues et variables des golfeurs élités et des jeunes non-athlètes sédentaires, nous avons calculé une ANOVA mixte à trois facteurs (2 groupes x 2 conditions cognitives x 4 cibles). Une ANOVA mixte à deux facteurs (2 groupes x 4 cibles) a également été effectuée pour tester l'effet du coût attentionnel de la tâche d'atteintes manuelles et de la tâche cognitive de soustraction mathématique.

Pour tester l'effet de la condition attentionnelle sur les limites de la stabilité posturale et les RMS des golfeurs élités et des non-athlètes sédentaires, nous avons effectué deux ANOVAs mixtes à trois facteurs (2 groupes x 2 conditions cognitives x 2 directions), une pour les directions antéropostérieures (avant et arrière) et une pour les directions médio-latérales (gauche et droite). Deux ANOVAs mixtes à deux facteurs (2 groupes x 2 directions) ont également été effectuées pour évaluer les différences de coût attentionnel de la tâche posturale et de la tâche cognitive de soustraction mathématique entre les groupes et les directions d'inclinaison.

Pour toutes les analyses statistiques, des comparaisons post-hocs par paires ont été effectuées en utilisant les corrections de Bonferroni. Un niveau alpha (p) significatif bilatéral de 0,05 a été utilisé.

CHAPITRE 5 – Résultats

5.1 – Atteinte manuelle 3D

5.1.1 – Erreurs absolues

Les golfeurs élités ont obtenu des erreurs absolues, en moyenne, plus petites que les non-athlètes sédentaires dans les deux conditions cognitives (Figure 2A). Les deux groupes de participants ont également démontré une petite augmentation de leurs erreurs absolues lors de l'ajout de la tâche cognitive attentionnelle. Par conséquent, l'écart moyen entre les deux groupes est demeuré sensiblement le même dans les deux conditions expérimentales. L'ANOVA n'était pas significative pour l'effet principal de groupe ($F(1,36) = 3,546$, $p = 0,071$, $\eta^2 = 0,120$). De plus, cette analyse n'a révélé aucun effet principal de la condition cognitive ($F(1,36) = 1,339$, $p > 0,05$, $\eta^2 = 0,049$) ni d'effet principal de la cible ($F(1,36) = 0,892$, $p > 0,05$, $\eta^2 = 0,033$). Aucune interaction ne s'est avérée significative entre les facteurs groupe, condition cognitive et cible.

5.1.2 – Erreurs variables

Les golfeurs élités ont obtenu des erreurs variables, en moyenne, plus petites que les non-athlètes sédentaires dans les deux conditions cognitives (Figure 2B). Contrairement aux golfeurs élités qui ont montré une légère diminution des erreurs variables moyennes lors de l'ajout de la tâche cognitive, les jeunes adultes sédentaires ont démontré une augmentation marquée de leur variabilité lors de l'ajout de la tâche cognitive attentionnelle. La différence moyenne entre les deux groupes s'est donc accentuée dans la condition avec tâche cognitive. En accord avec ces observations, l'ANOVA n'a révélé aucun effet principal de groupe ($F(1,36) = 2,809$, $p > 0,05$, $\eta^2 = 0,097$), aucun effet principal de la condition cognitive ($F(1,36) = 1,010$, $p > 0,05$, $\eta^2 = 0,037$) et aucun effet principal de la cible ($F(1,36) = 2,749$, $p > 0,05$, $\eta^2 = 0,096$). Cependant, cette analyse a démontré une interaction significative entre les facteurs groupe et condition cognitive ($F(1,36) = 4,936$, $p < 0,05$, $\eta^2 = 0,160$). Les analyses post-hocs ont confirmé que les positions finales des atteintes manuelles des golfeurs élités étaient significativement moins variables que celles des non-athlètes sédentaires uniquement dans la condition d'atteintes manuelles avec tâche cognitive ($p < 0,05$).

5.2 – Coût attentionnel de la tâche motrice d'atteintes manuelles

5.2.1 – Erreurs absolues

Lorsque la tâche d'atteintes manuelles était effectuée simultanément à la tâche cognitive de soustraction mathématique, les deux groupes ont obtenu un coût attentionnel moyen très similaire sur les erreurs absolues obtenues pour toutes les cibles (Figure 2C). L'ANOVA n'a donc révélé aucun effet de groupe ($F(1,36) = 0,002, p > 0.05, \eta^2 = 0,000$), aucun effet principal de cible ($F(1,36) = 2,394, p > 0.05, \eta^2 = 0,084$) ni d'interaction entre les facteurs groupes et cibles ($F(1,36) = 2,057, p > 0.05, \eta^2 = 0,073$). L'ajout de la tâche cognitive attentionnelle a donc exercé une influence similaire sur la taille des erreurs absolues chez les deux groupes de participants.

5.2.2 – Erreurs variables

Lors de la réalisation de la tâche d'atteintes manuelles simultanément à la tâche cognitive, les golfeurs ont obtenu un coût attentionnel moyen inférieur à celui des jeunes adultes sédentaires sur les erreurs variables obtenues pour les mouvements dirigés vers toutes les cibles (Figure 2D). L'ANOVA a donc démontré un effet principal de groupe ($F(1,36) = 6,059, p < 0.05, \eta^2 = 0,189$), mais aucun effet principal de cible ($F(1,36) = 2,814, p > 0.05, \eta^2 = 0,098$). Toutefois, aucune interaction entre les facteurs groupe et cible n'a été observée ($F(1,36) = 0,945, p > 0.05, \eta^2 = 0,035$). Ce résultat démontre que les non-athlètes sédentaires ont significativement augmenté la variabilité de leurs mouvements en condition de tâche double en comparaison aux golfeurs élités.

5.2.3 – Performances cognitives simple et double et coût attentionnel de la tâche cognitive

L'analyse de la performance individuelle des participants a également révélé que, lorsque la tâche cognitive de soustraction mathématique était effectuée simultanément à la tâche d'atteintes manuelles, les deux groupes de participants montraient une augmentation des erreurs de soustraction. Cependant, les non-athlètes sédentaires montraient une augmentation plus marquée des erreurs de soustraction en comparaison aux golfeurs élités pour les mouvements dirigés vers toutes les cibles (Tableau 1). L'écart des performances entre les groupes n'était pas significatif. L'ANOVA n'a révélé aucun effet principal de groupe

($F(1,36) = 1,640$, $p > 0.05$, $\eta^2 = 0,59$), un effet principal de condition cognitive ($F(1,36) = 17,000$, $p > 0.05$, $\eta^2 = 0,395$), alors que l'interaction entre les facteurs groupe et condition n'était pas significative ($F(1,36) = 3,442$, $p = 0,075$, $\eta^2 = 0,117$). En outre, le coût attentionnel de la tâche cognitive était significativement plus important chez les non-athlètes sédentaires, lorsque cette tâche secondaire était réalisée en même temps que la tâche d'atteintes manuelles (Figure 3). L'ANOVA a supporté ces observations. Elle a révélé un effet principal de groupe ($F(1,36) = 4,563$, $p < 0.05$, $\eta^2 = 0,149$), tandis qu'aucun effet principal de cible ($F(1,36) = 1,691$, $p > 0.05$, $\eta^2 = 0,061$) ni d'interaction entre les facteurs groupe et cible n'ont été trouvés ($F(1,36) = 0,945$, $p > 0.05$, $\eta^2 = 0,035$)

Figure 2 – Atteinte manuelle 3D

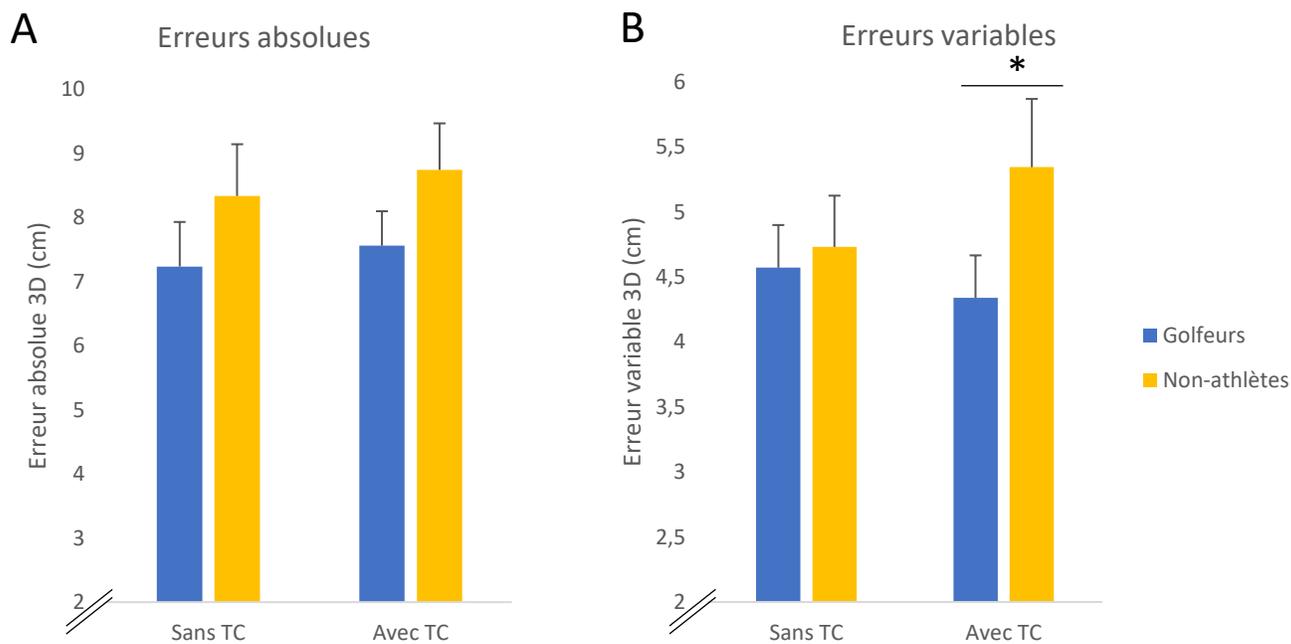


Figure 2AB Erreurs absolues 3D et erreurs variables 3D moyennes à travers les quatre cibles et les conditions sans tâche cognitive (Sans TC) et avec tâche cognitive (Avec TC) pour les golfeurs et les non-athlètes sédentaires.

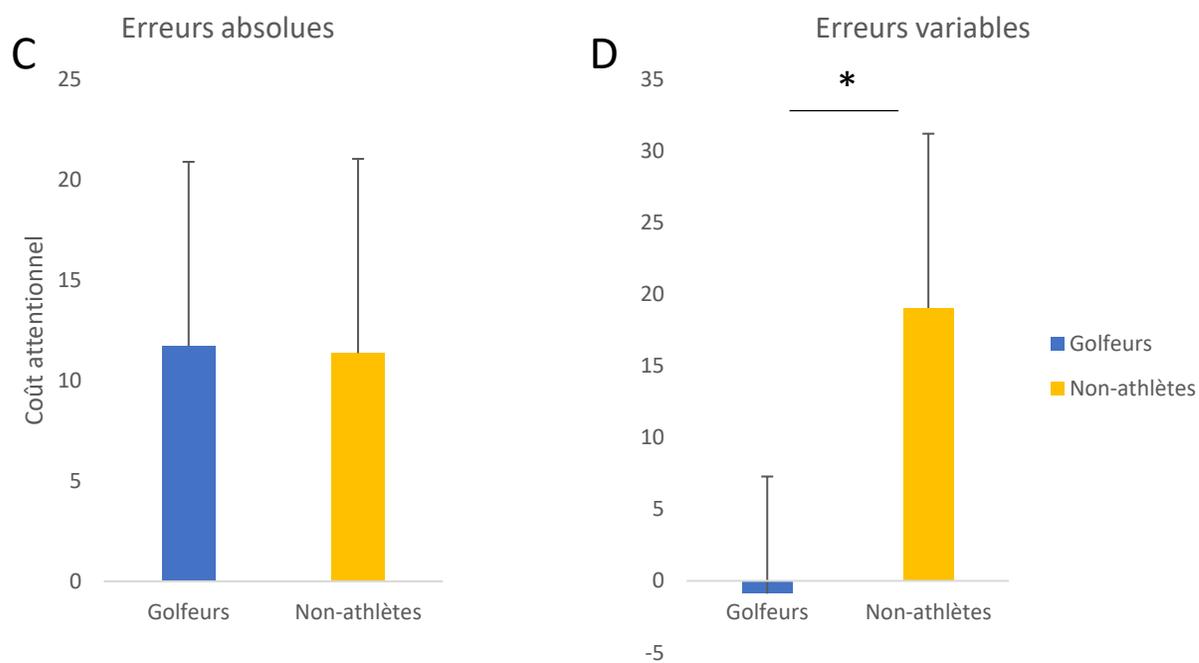


Figure 2CD Coût attentionnel de la tâche d'atteintes manuelles sur les erreurs absolues 3D et les erreurs variables 3D moyennes à travers les quatre cibles pour les golfeurs et les non-athlètes sédentaires. Les barres d'erreurs représentent les erreurs standards de la moyenne.

Tableau 1 – Performances cognitives simple et double avec l’atteinte manuelle

Condition	Golfeurs		Non-athlètes	
	Moyenne (%)	Erreur standard	Moyenne (%)	Erreur standard
TC seule	96,07	± 12,12	91,43	± 14,06
TC + atteinte manuelle	93,71	± 11,89	85,21	± 16,77

Tableau 1 Présentation des performances moyennes de la tâche cognitive de soustractions mathématiques des deux groupes de participants lors des conditions de tâche simple (TC seule) et de tâche double (TC + atteinte manuelle).

Figure 3 – Coût attentionnel de la tâche cognitive pendant l’atteinte manuelle

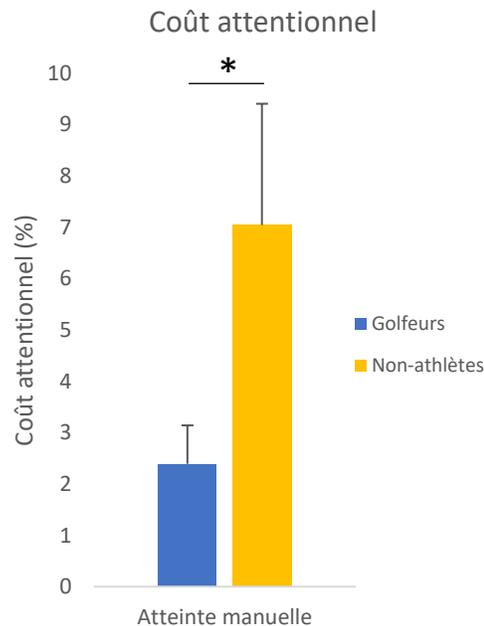


Figure 3 Coût attentionnel de la tâche cognitive en pourcentage pendant l’atteinte manuelle chez les golfeurs et les non-athlètes sédentaires. Les barres d'erreur représentent les erreurs standards de la moyenne.

5.3 – Limites de la stabilité

5.3.1 – Directions antéropostérieures

Les golfeurs élités ont atteint des limites de stabilité posturale moyennes légèrement supérieures à celles des jeunes adultes dans les deux conditions cognitives pour les directions antérieure et postérieure (Figure 4-AB). Lors de l’ajout de la tâche cognitive attentionnelle, les deux groupes ont légèrement diminué

leurs limites de la stabilité posturales lors de l'inclinaison vers l'avant et l'arrière. Les deux groupes de participants ont également affiché des limites plus petites lorsqu'ils s'inclinaient vers l'arrière par rapport à vers l'avant. L'ANOVA n'a donc révélé aucun effet principal de groupe ($F(1,36) = 1,121, p > 0.05, \eta^2 = 4,064$), ni d'effet de la condition cognitive ($F(1,36) = 2,152, p > 0.05, \eta^2 = 1,246$). Cependant, un effet principal de la direction de l'inclinaison a été observé ($F(1,36) = 56,476, p < 0.05, \eta^2 = 321,746$). Aucune interaction entre ces facteurs ne s'est avérée significative.

Figure 4 – Limites de la stabilité antéropostérieures et médio-latérales

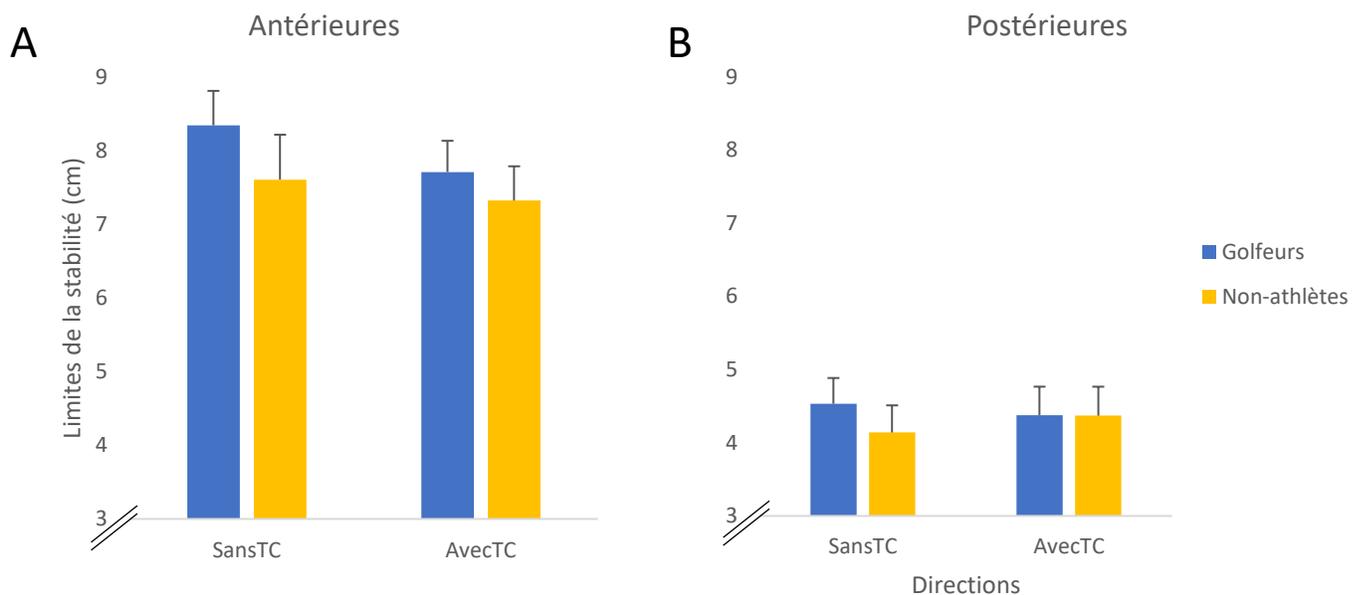


Figure 4AB Limites de la stabilité posturale dans les directions d’inclinaison antérieure (A) et postérieure (B) dans les conditions sans tâche cognitive (sans TC) et avec tâche cognitive (avec TC) pour les golfeurs et les non-athlètes sédentaires. Les barres d’erreur représentent les erreurs standards de la moyenne.

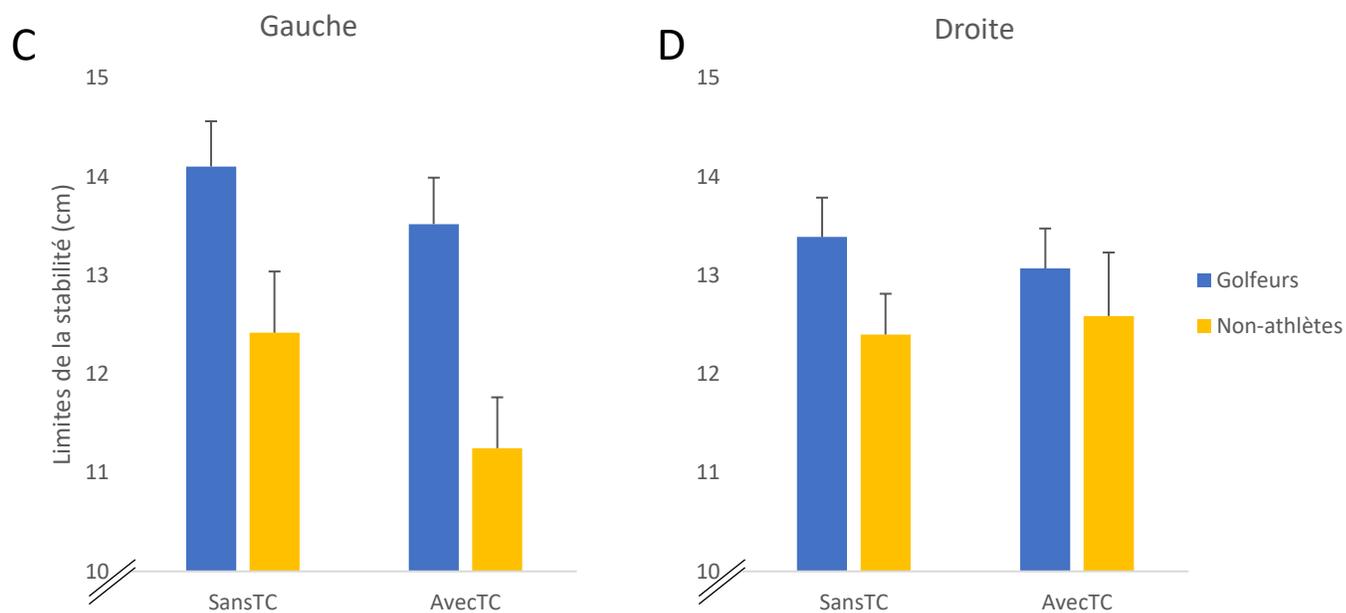


Figure 4CD Limites de la stabilité posturale dans les directions d’inclinaison gauche (C) et droite (D) dans les conditions sans tâche cognitive (sans TC) et avec tâche cognitive (avec TC) pour les golfeurs et les non-athlètes sédentaires. Les barres d’erreur représentent les erreurs standards de la moyenne.

5.3.2 – Directions médio-latérales

Les golfeurs élités ont atteint des limites de stabilité posturale moyennes supérieures à celles des jeunes adultes dans les deux conditions cognitives pour les directions gauche et droite (Figure 4-CD). En outre, la différence entre les groupes dans l'amplitude des limites de stabilité était plus grande pour l'inclinaison vers la gauche par rapport à l'inclinaison vers la droite. Dans la condition de tâche double, les deux groupes ont réduit la taille de leurs limites de stabilité en comparaison à la tâche simple lors de l'inclinaison vers la gauche. Cependant, lors de l'inclinaison vers la droite, alors que les golfeurs ont diminué légèrement la taille moyenne de leurs limites, les limites des sujets sédentaires sont restées, en moyenne, sensiblement les mêmes. Par ailleurs, la différence entre les deux groupes s'est agrandie lors de l'inclinaison vers la direction gauche. L'ANOVA a révélé un effet principal de groupe ($F(1,36) = 3,244, p < 0.05, \eta^2 = 0,10$) et un effet principal de la condition cognitive ($F(1,36) = 4,716, p < 0.05, \eta^2 = 0,12$). Cette analyse a également révélé une interaction significative entre les facteurs direction et condition cognitive ($F(1,36) = 6,294, p < 0.05, \eta^2 = 0,18$).

5.4 – Erreurs quadratiques moyennes

5.4.1 – Directions antéropostérieures

Les erreurs quadratiques moyennes ont montré des tendances variables entre les groupes, les conditions cognitives et les directions d'inclinaison (Figure 5-AB). En accord avec ces observations, L'ANOVA n'a révélé aucun effet de groupe ($F(1,36) = 0,149, p > 0.05, \eta^2 = 0,005$), aucun effet de la condition cognitive ($F(1,36) = 1,188, p > 0.05, \eta^2 = 0,038$), aucun effet de la direction d'inclinaison le long de l'axe antéropostérieur ($F(1,36) = 1,283, p > 0.05, \eta^2 = 0,041$) ni d'interaction significative entre ces facteurs ($F(1,36) = 1,728, p > 0.05, \eta^2 = 0,055$).

Figure 5 – Erreurs quadratiques moyennes antéropostérieures et médio-latérales

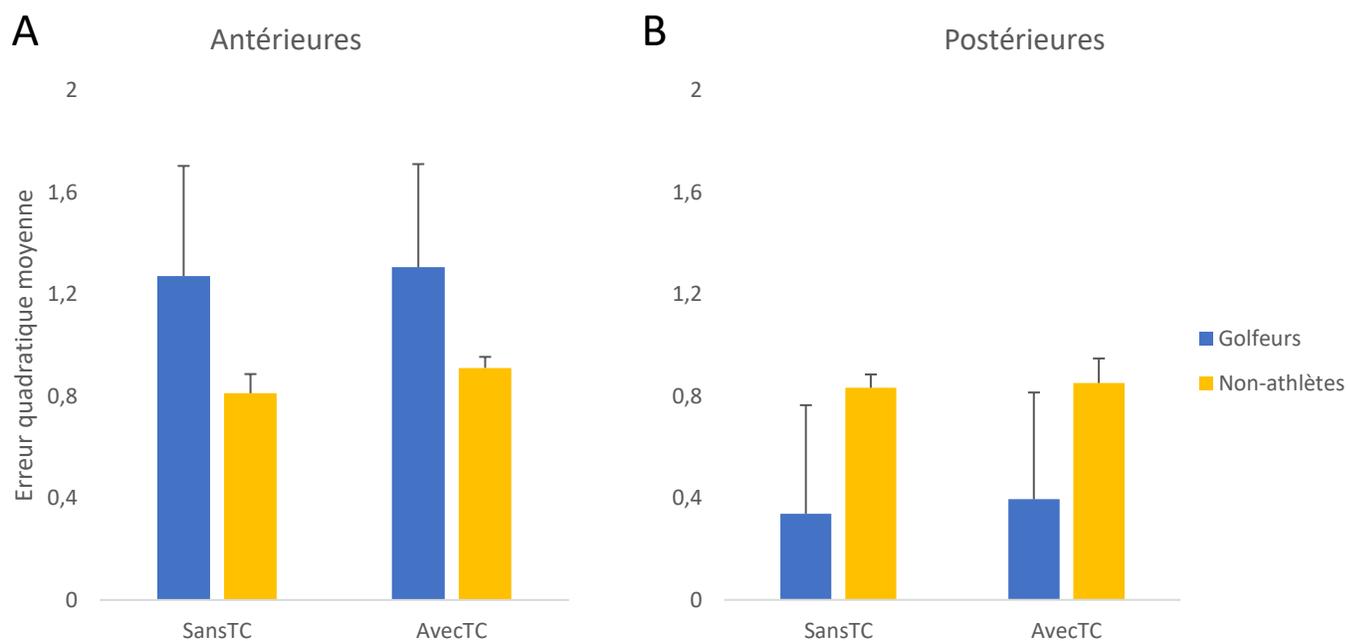


Figure 5AB Variabilité dans le maintien des limites maximales de la stabilité dans les directions d'inclinaison antérieure (A) et postérieure (B) dans les conditions sans tâche cognitive (sans TC) et avec tâche cognitive (avec TC) pour les golfeurs et les non-athlètes sédentaires. Les barres d'erreur représentent les erreurs standards de la moyenne.

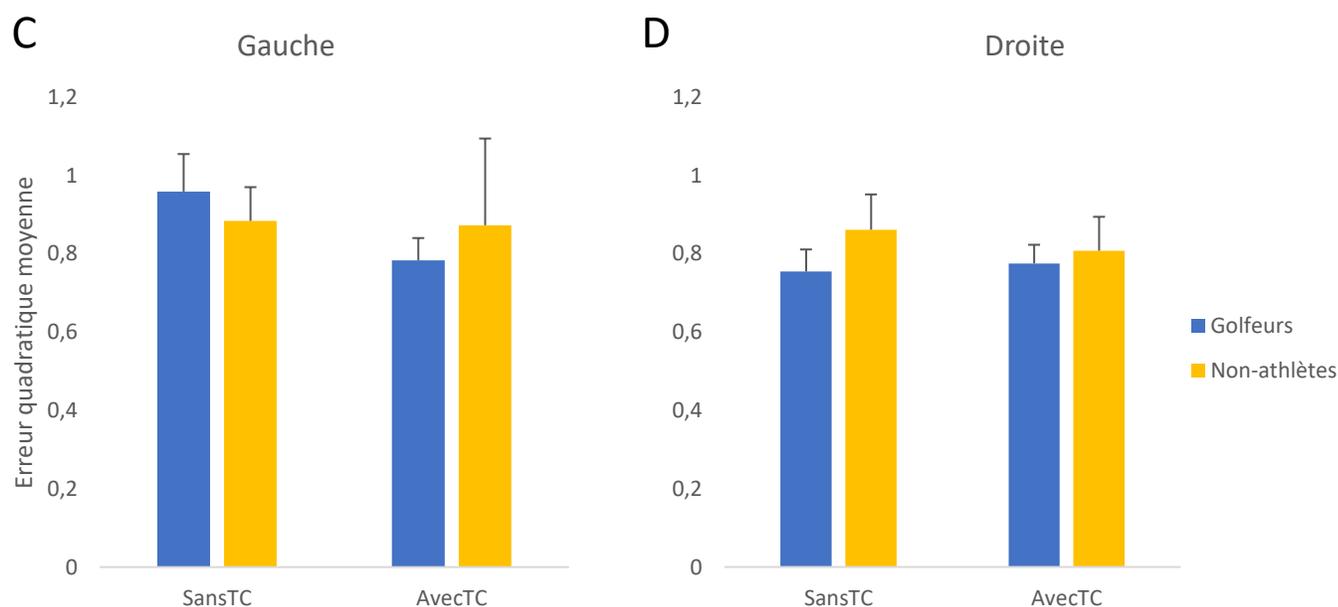


Figure 5CD Variabilité dans le maintien des limites maximales de la stabilité dans les directions d'inclinaison gauche (C) et droite (D) dans les conditions sans tâche cognitive (sans TC) et avec tâche cognitive (avec TC) pour les golfeurs et les non-athlètes sédentaires. Les barres d'erreur représentent les erreurs standards de la moyenne.

5.4.2 – Directions médio-latérales

Les golfeurs élités ont obtenu des erreurs quadratiques moyennes légèrement inférieures à celles des non-athlètes sédentaires sauf lors de l'inclinaison vers la gauche dans la condition de tâche simple. (Figure 5-CD). L'ANOVA n'a cependant révélé aucun effet de groupe ($F(1,36) = 0,138, p > 0.05, \eta^2 = 0,005$), aucun effet de la condition cognitive ($F(1,36) = 0,879, p > 0.05, \eta^2 = 0,033$), ainsi qu'aucun effet de la direction de l'inclinaison ($F(1,36) = 0,981, p > 0.05, \eta^2 = 0,036$). De plus, aucune interaction entre ces facteurs ne s'est avérée significative.

5.5 – Coût attentionnel de la tâche posturale sur les limites de la stabilité médio-latérales

Les golfeurs ont obtenu des coûts attentionnels de la tâche posturale plus bas que les non-athlètes sédentaires dans les directions d'inclinaison vers la gauche et vers la droite. De plus, les deux groupes de participants ont montré des coûts attentionnels moins élevés pour l'inclinaison vers la droite en comparaison à l'inclinaison vers la gauche. Finalement, l'écart des coûts attentionnels entre les deux groupes était plus important pour l'inclinaison vers la gauche (Figure 6-AB). En accord avec ces affirmations, l'ANOVA n'a révélé aucun effet de groupe ($F(1,36) = 0,020, p > 0.05, \eta^2 = 0,001$). Cependant un effet principal de la direction de l'inclinaison a été trouvé ($F(1,36) = 6,928, p < 0.05, \eta^2 = 0,210$) alors que l'interaction entre les facteurs direction et groupe n'était pas significative ($F(1,36) = 3,925, p = 0,058, \eta^2 = 0,131$).

Figure 6 – Coût attentionnel de la tâche posturale sur les limites de la stabilité médio-latérales

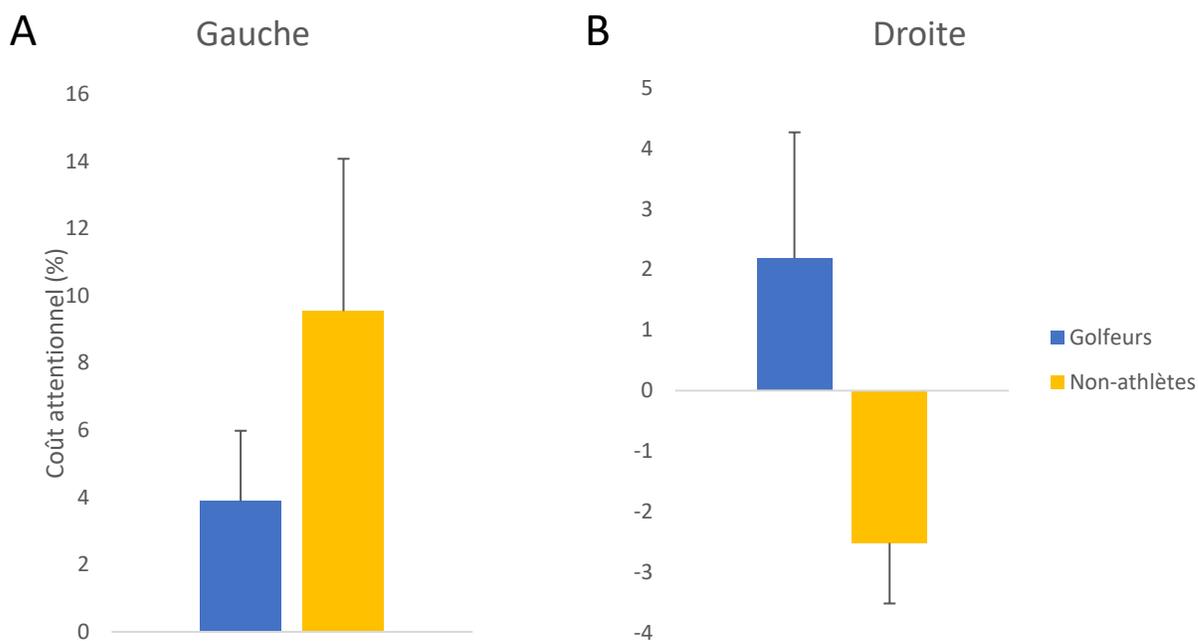


Figure 6AB Coût attentionnel de la tâche posturale sur les limites de la stabilité pour les directions médio-latérales gauche et droite pour les golfeurs et les non-athlètes sédentaires. Les barres d'erreur représentent les erreurs standards de la moyenne.

5.5.1 – Performances cognitives simple et double et coût attentionnel de la tâche cognitive

L'analyse de la performance individuelle des participants a également révélé que, lorsque la tâche cognitive de soustraction mathématique était effectuée simultanément à la tâche posturale, les deux groupes de participants montraient une augmentation des erreurs de soustraction. Cependant, les non-athlètes sédentaires montraient une augmentation plus marquée des erreurs de soustraction en comparaison aux golfeurs élités pour toutes les directions d'inclinaison (Tableau 2). Cependant, l'ANOVA n'a pas révélé de différence significative entre les groupes ($F(1,36) = 1,698, p > 0.05, \eta^2 = 0,061$) ni de différence entre les directions d'inclinaison ($F(1,36) = 0,277, p > 0.05, \eta^2 = 0,011$), ainsi qu'aucune interaction significative entre ces facteurs. En outre, lors de la réalisation de la tâche de soustraction mathématique simultanément à la tâche de limites de la stabilité posturale, les golfeurs ont obtenu un coût attentionnel moyen moins élevé que les jeunes adultes sédentaires (Figure 7). Cependant, l'ANOVA n'a pas révélé de différence significative entre les groupes ($F(1,36) = 1,698, p > 0.05, \eta^2 = 0,061$) ni de différence entre les directions d'inclinaison ($F(1,36) = 0,277, p > 0.05, \eta^2 = 0,011$). De plus, aucune interaction significative n'a été observée entre ces facteurs.

Tableau 2 – Performances simple et double de la tâche cognitive avec tâche posturale

Condition	Golfeurs		Non-athlètes	
	Moyenne (%)	Erreur standard	Moyenne (%)	Erreur standard
TC seule	96,07	± 12,12	91,43	± 14,06
TC + tâche posturale	92,72	± 14,20	84,86	± 17,84

Tableau 2 Présentation des performances moyennes de la tâche cognitive de soustractions mathématiques des deux groupes de participants lors des conditions de tâche simple (TC seule) et de tâche double (TC + tâche posturale).

Figure 7 – Coût de la tâche cognitive attentionnelle pendant la tâche posturale

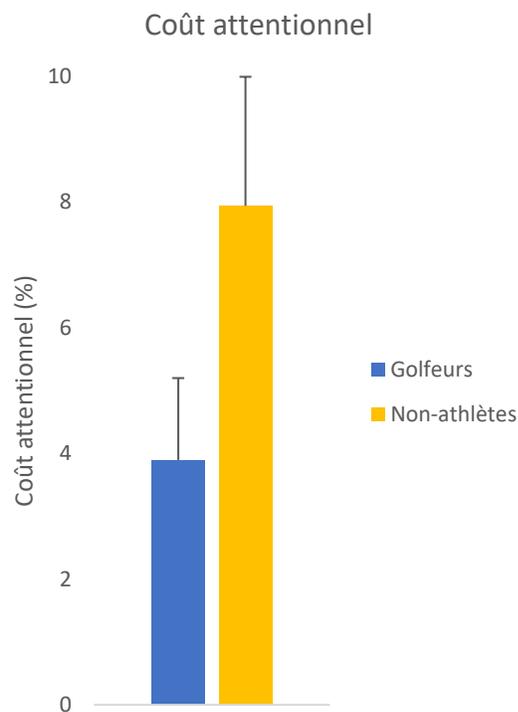


Figure 7 Coût attentionnel moyen de la tâche cognitive réalisée lors des quatre directions d'inclinaison (antérieure, postérieure, droite et gauche) pour les golfeurs et les non-athlètes sédentaires. Les barres d'erreur représentent les erreurs standards de la moyenne.

CHAPITRE 6 – Discussion

La présente étude est la première à investiguer le contrôle proprioceptif et la demande attentionnelle de la performance proprioceptive des golfeurs élités. Pour ce faire, nous avons utilisé deux tâches motrices expérimentales comportant des exigences élevées au niveau du traitement des informations proprioceptives. La première est une tâche d'atteintes manuelles vers des cibles tridimensionnelles définies par les informations proprioceptives. Dans la seconde tâche, nous avons quantifié les limites de la stabilité posturale antéropostérieures et médio-latérales en l'absence de vision. Ces deux tâches motrices ont été effectuées seules (tâche simple) et simultanément à une tâche cognitive attentionnelle de soustractions mathématiques (tâche double). Nos résultats démontrent des différences significatives entre les habiletés proprioceptivo-cognitives des golfeurs élités et des participants non-athlètes sédentaires. Cependant, ces différences étaient dépendantes des tâches motrices évaluées. Les résultats des deux tâches expérimentales seront donc discutés en détail dans des sections séparées.

6.1 – Tâche d'atteintes manuelles tridimensionnelle

6.1.1 – Condition de tâche simple

L'athlète d'élite traite et intègre continuellement les informations proprioceptives afin d'organiser et de guider la performance motrice optimale. La recherche a démontré que l'acquisition d'habiletés motrices améliore la proprioception, et en retour, une acuité proprioceptive supérieure permet une meilleure performance motrice et augmente l'acquisition de nouvelles habiletés motrices (Goble et Anguera, 2010). Il est donc normal de s'attendre à ce que les athlètes élités traitent et intègrent les informations proprioceptives plus efficacement que la population générale et qu'ils présentent une acuité proprioceptive supérieure.

Certaines recherches ont démontré que les athlètes élités présentent des habiletés proprioceptives supérieures à des sujets témoins non-athlètes. Cependant, la majorité de ces études ont utilisé des tâches monoarticulaires. Bien que ces approches soient appropriées pour évaluer la sensibilité proprioceptive à une articulation spécifique, elle ne reflète pas la complexité du geste sportif qui fait généralement intervenir des mouvements à plusieurs articulations effectués dans l'espace

tridimensionnel. De plus, la presque totalité des études a porté sur la proprioception des articulations du membre inférieur (Han et al. 2015; Sahin et al. 2015; Muaidi et al. 2009).

Très peu d'études se sont intéressées aux habiletés proprioceptives du membre supérieur des athlètes élités. Une étude menée par Nodehi-Moghadam et ses collègues (2013) a montré que des lanceurs de baseball experts avaient une meilleure sensibilité proprioceptive à l'articulation de l'épaule lors de mouvements de rotations internes. Les participants ont effectué une tâche proprioceptive de reproduction d'angles à l'épaule. Ils devaient appuyer sur un interrupteur lorsqu'ils percevaient que l'angle à l'épaule correspondait à un angle de référence. Cette étude a indiqué que les lanceurs de baseball avaient une meilleure acuité proprioceptive à l'épaule en comparaison à des participants sans expérience sportive. Dans cette étude, les athlètes lanceurs avaient des erreurs absolues d'appariement deux fois plus petites que celles du groupe témoin. Ce résultat concorde avec les données obtenues sur l'évaluation du membre inférieur et supporte l'idée selon laquelle les athlètes élités ont une sensibilité proprioceptive supérieure aux non-athlètes.

À notre connaissance, la performance proprioceptive du membre supérieur des golfeurs élités n'a jamais été investiguée. Dans la présente étude, nous avons évalué l'acuité du contrôle proprioceptif d'atteintes manuelles multi articulaires effectuées dans l'espace tridimensionnel. Cette situation expérimentale s'apparente à la complexité du geste sportif, étant donné qu'elle requiert la synchronisation précise des mouvements aux articulations adjacentes, le contrôle des moments de force intersegmentaires ainsi que des compensations adaptées à la force gravitationnelle. Malgré un écart important de vitesse d'exécution entre les protocoles utilisés dans cette recherche et celle de l'élan de golf, ceci demeure important, puisque ces habiletés motrices complexes dépendent prioritairement de l'efficacité du traitement et de l'intégration des informations proprioceptives (Cordo. 1990; Kawato. 1999; Sainburg et al. 1993; Messier et al. 2003).

Étant donné que la fonction proprioceptive joue un rôle déterminant dans la performance sportive (Hrysomallis, 2011; Han et al. 2015) et que certaines études ont suggéré que la sensibilité proprioceptive des athlètes d'élite est supérieure aux non-athlètes (Sahin et al. 2015), nous avons émis l'hypothèse que les golfeurs élités montreraient des erreurs absolues et variables d'atteintes manuelles plus petites que les participants sédentaires dans les conditions de tâche simple.

Dans la condition de tâche simple, les athlètes ont montré des erreurs absolues, en moyenne, plus petites que les participants sédentaires. Cependant, cette différence ne s'est pas avérée statistiquement significative ($p=0,071$). Il est possible que ce résultat soit simplement dû à un manque de puissance

statistique en raison du petit échantillon de participants testé dans cette étude. Il est également possible que le calcul des erreurs 3D absolues ne se soit pas avéré une variable suffisamment sensible pour évaluer la performance proprioceptive étant donné qu'elle combine les erreurs commises le long des axes horizontal, sagittal et vertical. Cette idée est confortée par les résultats de certaines études qui ont suggéré que la contribution des informations proprioceptives aux contrôles d'atteintes manuelles le long de ces axes est différente (Sainburg et al. 1993, Messier et al. 2003, Lefrançois et Messier 2019). Par exemple, une étude récente s'intéressant à l'adaptation visuomotrice, dans le contexte d'atteintes manuelles tridimensionnelles, a suggéré que le poids attribué aux informations proprioceptives serait plus élevé pour la composante verticale du mouvement, qui nécessite des compensations pour la force gravitationnelle, en comparaison aux axes horizontal et sagittal (Lefrançois et Messier 2019). D'autres études ont montré que les patients atteints d'une désafférentation proprioceptive ou encore de la maladie de Parkinson, chez qui des désordres dans l'intégration des informations proprioceptives ont été identifiés, présentent des erreurs 3D absolues largement expliquées par les erreurs commises le long de l'axe vertical (Poizner et al. 1991; Messier et al. 2003; Mongeon et al. 2009). Dans cette perspective, il est plausible qu'une différence significative entre les erreurs absolues des golfeurs élités et celles des non-athlètes sédentaires soit identifiée si les erreurs absolues 3D étaient décomposées en erreurs de direction (axe horizontal), de distance (axe sagittal) et d'élévation (axe vertical). Des études futures incluant un plus grand échantillon de participants permettraient d'augmenter la puissance statistique et la sensibilité de cette mesure d'acuité proprioceptive. De plus, des analyses détaillées de chacune des composantes de l'erreur 3D absolue permettront d'apporter des conclusions plus étayées concernant l'effet de l'entraînement en golf sur l'acuité des sensations proprioceptives le long des trois axes de l'espace tridimensionnel.

Contrairement aux erreurs absolues, l'analyse des erreurs variables commises en condition de tâche simple a montré une variabilité très similaire entre les golfeurs élités et les participants sédentaires. L'habileté à produire des gestes sportifs avec une grande précision et une constance remarquable est un aspect important de la performance sportive. Par conséquent, de façon similaire aux erreurs absolues, la décomposition des erreurs variables le long des trois axes de l'espace 3D permettrait une analyse plus détaillée de l'effet de l'entraînement au golf sur la capacité à effectuer des mouvements répétables au cours des essais successifs.

6.1.2 – Condition de tâche double

Certaines études ont montré que les athlètes d'élite présentent une meilleure performance que les sujets non-athlètes en condition de tâche double (Negahban et al. 2013; Gray, 2004; Smith et Chamberlin, 1992). Ces résultats suggèrent que la demande attentionnelle de la performance motrice de l'athlète d'élite est inférieure à des sujets témoins non-athlètes. À notre connaissance, aucune étude n'a évalué la demande attentionnelle du traitement des informations proprioceptives chez les athlètes élités. Par ailleurs, une seule étude récente a démontré que le traitement des informations proprioceptives comporte une demande attentionnelle chez les jeunes adultes (Yasuda et al. 2014). Dans cette étude, les participants devaient effectuer une tâche d'appariement d'angle à la cheville ipsilatérale en condition de tâche simple et double. De manière similaire à notre étude, l'articulation de la cheville était déplacée passivement à une position cible durant 12 secondes (phase encodage). Les participants devaient ensuite effectuer un mouvement actif afin de reproduire cette position cible dans des conditions de tâche simple et de tâche double. Deux cohortes de jeunes adultes ont participé à cette étude. En condition de tâche double, ils devaient effectuer une tâche cognitive de soustraction mathématique de deux niveaux de difficulté différents durant la phase d'encodage. La première cohorte effectuait une tâche facile durant laquelle elle devait effectuer une soustraction simple ($n-3$) toutes les trois secondes. La deuxième cohorte devait effectuer une soustraction plus difficile ($n-7$) chaque seconde. Les résultats ont démontré que la performance proprioceptive des jeunes adultes était compromise uniquement lors de l'exécution de la tâche double impliquant la tâche cognitive difficile. Ce résultat corrobore l'hypothèse selon laquelle l'allocation des ressources attentionnelles à une tâche cognitive secondaire peut conduire à une détérioration de la performance proprioceptivo-motrice. De surcroît, ces observations supportent l'idée que l'exécution d'une tâche cognitive difficile simultanément à une tâche motrice entraîne une compétition entre les processus cognitifs et sensorimoteurs pour l'utilisation de ressources attentionnelles (Huxhold et al. 2006, Salihu et al. 2022).

De façon intéressante, certaines études ont suggéré que la réduction de l'acuité des sensations proprioceptives qui accompagne le vieillissement normal ou une pathologie neurologique entraîne une augmentation de la demande attentionnelle pour le contrôle du mouvement et de la posture ainsi que pour le traitement des informations proprioceptives (Boigontier et al. 2013; Goble et al. 2012). Chez ces personnes, des processus de traitement « contrôlé » faisant intervenir des structures nerveuses hiérarchiquement supérieures comme le cortex cérébral et les ganglions de la base permettraient un

contrôle plus cognitif et conscient de la performance sensorimotrice, mobilisant ainsi une large proportion des ressources attentionnelles.

Des résultats opposés ont également été rapportés. Ces études ont été menées majoritairement chez de jeunes adultes, mais aussi chez des personnes âgées en santé dans le contexte de tâches posturales simples (posture statique). Elles ont montré que la performance motrice est parfois similaire ou même supérieure en condition de tâche double en comparaison à une condition de tâche simple (Lajoie et al. 1993; Salihu et al. 2022). Ces observations ont suggéré que, chez les personnes en santé, l'introduction d'une tâche secondaire cognitive à une tâche motrice servirait d'accent attentionnel externe. Ce faisant, elle permettrait de libérer ou extraire les ressources attentionnelles de la performance motrice afin de favoriser un traitement plus automatique des informations sensorimotrices (Lajoie et al. 1993, Boigontier et al. 2013, Henry et Baudry, 2019; Salihu et al. 2022).

Basé sur ces études antérieures, nous avons prédit que les golfeurs élités montreraient une demande attentionnelle inférieure aux participants sédentaires en raison d'un traitement plus efficace et automatique des informations proprioceptives. L'analyse des erreurs absolues n'a pas révélé de différence entre les groupes ni d'effet de la tâche cognitive. Cependant, en accord avec cette hypothèse, les golfeurs élités ont obtenu des erreurs variables significativement plus petites que les non-athlètes sédentaires en condition de tâche double. Il est intéressant de souligner que les golfeurs élités ont montré, en moyenne, une diminution des erreurs variables dans la condition de tâche double en comparaison à la tâche simple. À l'inverse, les sujets sédentaires ont montré une augmentation notable des erreurs variables moyennes dans la condition de tâche double par rapport à la tâche simple.

Ensemble, les erreurs variables significativement plus grandes des sujets témoins sédentaires par rapport aux golfeurs experts dans la condition de tâche double et la tendance opposée dans les erreurs variables entre les conditions de tâche simple et double suggèrent fortement que les deux groupes de participants ont utilisé des stratégies de contrôle différentes. En lien avec la littérature, nous proposons que les athlètes élités utilisent prioritairement des processus de contrôle automatique inconscients faisant intervenir des structures hiérarchiquement inférieures comme le tronc cérébral, la moelle épinière et le cervelet. À l'opposé, les participants sédentaires utilisent, de façon plus importante, des processus de contrôle conscients qui demandent de plus grandes ressources attentionnelles et qui font intervenir des structures hiérarchiquement plus élevées comme le cortex cérébral et les ganglions de la base (Glover, 2005; Honeycutt et al. 2009; Jacobs et Horak, 2007).

Le fait que le coût attentionnel de la tâche d'atteintes manuelles calculé sur les erreurs variables soit beaucoup plus élevé chez les participants sédentaires (7,04%) en comparaison aux golfeurs élités (2,39%) ajoute du support à cette théorie. Nous suggérons que les capacités d'intégration proprioceptive supérieures chez les golfeurs leur permettent d'effectuer des atteintes manuelles plus constantes au cours des essais successifs. Finalement, ces résultats suggèrent que l'analyse des erreurs variables d'atteintes manuelles est une approche sensible pour identifier les différences dans la demande attentionnelle de la performance proprioceptive et les stratégies de contrôle entre les athlètes élités et les sujets sédentaires.

La capacité d'effectuer un geste de façon répétable au cours des essais successifs est l'une des caractéristiques remarquables de la performance athlétique. Nous savons toutefois que la variabilité est une composante inhérente à la fonction neuromusculaire et la performance motrice (Preatoni et al. 2013). Par conséquent, lorsque nous effectuons le même mouvement au cours d'essais successifs, un certain niveau de variabilité est observé, même lorsque le niveau de maîtrise du geste est très élevé. Au cours des dernières décennies, plusieurs études ont tenté de départager la variabilité inhérente aux caractéristiques biomécaniques du mouvement de celles liées aux processus de contrôle (Bartlett, 2005, Gordon et al. 1994, Messier et al. 1997, 1999). Chez la personne en santé et lors d'une pathologie neurologique, un degré excessif de variabilité est fréquemment associé à des changements structuraux et fonctionnels. Ces changements ont souvent été interprétés comme le reflet d'une augmentation du bruit neuronal dans le système sensorimoteur qui pourrait altérer les signaux de contrôle (Cremer et Zeef 1987; Kail 1997; Mozolic et al. 2012; Messier et al. 2003; Mongeon et al. 2009; Henry et Beaudry 2019).

Dans la littérature sur la posture et la marche, une augmentation du niveau de variabilité de la performance a suggéré l'implication de processus corticaux afin de contrôler consciemment le mouvement en mobilisant des ressources cognitives (Leach et al 2018; Sogev-Seligmann et al. 2008). Nous disposons de peu d'informations sur les changements neuro-fonctionnels qui se produisent chez l'athlète d'élite (Preatoni et al. 2013). Une hypothèse plausible est que le haut niveau d'entraînement des golfeurs élités engagerait des changements structurels et fonctionnels dans le système sensorimoteur. Cette plasticité sensorimotrice favoriserait un transfert vers des mécanismes de contrôle plus automatique du mouvement, et en retour, permettrait aux athlètes de produire des gestes sportifs avec une plus grande répétabilité et une moins grande demande attentionnelle. À l'inverse, chez les participants sédentaires, un ratio signal sur bruit plus faible impliquerait un traitement conscient plus important et moins automatique résultant à une charge cognitive augmentée (Henry et Baudry, 2019).

Une question intéressante qui demeure est de savoir si les athlètes d'élite en golf démontrent une performance motrice supérieure aux sujets témoins grâce à l'utilisation d'une stratégie de priorisation de la tâche motrice au détriment de la tâche cognitive. Si cette hypothèse était vraie, les athlètes d'élite devraient montrer une diminution de la performance cognitive dans la condition de tâche double et possiblement une performance cognitive inférieure aux sujets témoins. L'analyse de la performance cognitive a révélé que les deux groupes de participants ont diminué leur performance cognitive dans la condition de tâche double en comparaison à la condition de tâche cognitive simple. Cet effet d'interférence de la tâche motrice sur la tâche cognitive indique que les deux groupes de participants ont mobilisé une proportion de leurs ressources attentionnelles pour effectuer la tâche motrice. En revanche, l'analyse du coût attentionnel de la tâche cognitive, qui est basée sur la performance individuelle, a révélé que les non-athlètes sédentaires ont montré une diminution significativement plus marquée de leur performance cognitive comparativement aux golfeurs élités lorsqu'ils ont effectué la tâche cognitive simultanément à la tâche d'atteintes manuelles. Ces résultats convergent avec ceux du coût attentionnel de la performance motrice et procurent des arguments additionnels à l'effet que la demande attentionnelle du traitement des informations proprioceptives du membre supérieur est moins élevée chez les athlètes d'élite en golf que chez des participants non-athlètes sédentaires.

Afin de dépasser la limite des ressources neuronales et causer une interférence, les tâches motrices et cognitives effectuées simultanément doivent être suffisamment difficiles (Rapp et al. 2006; Dumas et al. 2008; Dumas et al. 2009; Salihu et al. 2022). Dans notre étude, la tâche cognitive de soustraction mathématique était facile pour de jeunes adultes en santé (Yasuda et al. 2014). Il est donc possible qu'une tâche cognitive plus difficile ait mené à des différences plus grandes entre les groupes. Cependant, l'observation de différences significatives entre les groupes dans le niveau de variabilité et dans la performance cognitive en condition de tâche double, même dans le contexte de cette tâche cognitive facile, suggère que la tâche motrice d'atteintes manuelles vers des cibles proprioceptives tridimensionnelles est une tâche relativement complexe et suffisamment sensible pour évaluer la demande attentionnelle de la performance proprioceptive.

En somme, nos résultats démontrent, pour la première fois, que le traitement des informations proprioceptives du membre supérieur des athlètes d'élite est moins affectée par une tâche cognitive attentionnelle que chez les personnes non-athlètes sédentaires. L'âge des participants, l'intégrité du système sensorimoteur et le degré de complexité de la tâche motrice sont souvent considérés comme les facteurs déterminants de la performance en double tâche (Salihu et al. 2022). Les résultats de cette étude

suggèrent que le niveau de compétence et/ou d'entraînement est également un facteur déterminant de la demande attentionnelle de la performance motrice.

6.2 – Limites de la stabilité posturale

6.2.1 – Condition de tâche simple

Contrairement à la performance proprioceptive du membre supérieur, de nombreuses études ont investigué le contrôle postural des athlètes d'élite. Le contrôle efficace de l'équilibre postural est un important prérequis à la précision des mouvements volontaires dans le sport et, par conséquent, à la performance athlétique (Paillard et al. 2022). Une multitude d'études ont démontré que les athlètes de différentes disciplines sportives présentent une stabilité posturale supérieure aux non-athlètes lors de tests posturaux standards évaluant la posture debout les yeux ouverts (Andreeva et al. 2021). Ces observations ont suggéré que la pratique de n'importe quel sport améliore la stabilité posturale. Cependant, les résultats sont plus mitigés entre les groupes de non-athlètes et les athlètes de différentes disciplines sportives dans les conditions yeux fermés (Andreeva et al. 2021). De plus, substantiellement moins d'études ont évalué les habiletés posturales des athlètes élités dans des conditions posturales dynamiques.

La performance golfique implique la capacité remarquable d'effectuer un mouvement des bras et du corps entier afin de diriger la tête du bâton à la balle, tout en contrôlant finement les perturbations posturales internes, causées par les transferts de forces entre les différents segments corporels. Ces aspects du contrôle postural dynamique dépendent de façon importante de l'intégration des informations proprioceptives à divers segments articulaires (Doumas et al. 2008; Speers et al. 2002; Teasdale et Simoneau 2001). De plus, la performance golfique est fréquemment effectuée sur un terrain dont la surface est inégale. Or, l'habileté de percevoir les irrégularités du terrain et les oscillations corporelles dépend de façon prioritaire des informations proprioceptives à la cheville (Han et al. 2015; Rein et al. 2011). La pratique régulière du golf pourrait donc améliorer la proprioception et augmenter le contrôle de la stabilité posturale.

Très peu d'études ont évalué la proprioception et le contrôle postural dynamique de golfeurs expérimentés. De façon intéressante, une étude a indiqué que l'acuité des sensations proprioceptives au niveau du tronc est supérieure chez les golfeurs élités en comparaison à des non-golfeurs (Glofcheskie et Brown, 2017). Une autre recherche a montré que des joueurs de golf âgés (âge moyen $66,2 \pm 6,8$ ans) présentent des sensations proprioceptives plus précises que des non-golfeurs âgés (âge moyen de $71,3 \pm 6,6$ ans) (Tsang et Hui-Chan, 2010). Par ailleurs, certaines études ont démontré que les golfeurs âgés (âge moyen : $66,2 \pm 6,8$ ans) présentent une meilleure stabilité posturale debout et de plus grandes limites antéropostérieures que des non-golfeurs (âge moyen : $71,3 \pm 6,6$ ans) lors d'une condition dynamique avec les yeux ouverts (Gao et al. 2011; Tsang et Hui-Chan, 2004).

À notre connaissance, aucune étude n'a évalué les limites antéropostérieures et médio-latérales de la stabilité posturale d'athlètes élités en golf dans une condition dynamique avec les yeux fermés, c'est-à-dire lorsque la demande proprioceptive est plus élevée. Nous avons émis comme hypothèse que le contrôle proprioceptif de la posture dynamique serait supérieur chez les golfeurs élités en comparaison à des participants non-athlètes sédentaires. Dans notre étude, les golfeurs élités ont montré des limites antéropostérieures de la stabilité posturale légèrement supérieures aux sujets témoins sédentaires. Cependant, cette différence ne s'est pas avérée significative. Par ailleurs, les limites de la stabilité posturale des deux groupes de participants étaient significativement plus petites lors de l'inclinaison vers l'avant en comparaison à l'inclinaison vers l'arrière. Ce résultat était attendu et reflète les contraintes anatomiques et biomécaniques du complexe pied-cheville communes aux deux groupes de participants. En effet, en position debout neutre, quand la projection du centre de masse se trouve au milieu de la base de support, la limite postérieure de la surface de support est substantiellement inférieure à la limite antérieure.

En contrepartie, l'analyse des limites de la stabilité posturale le long de l'axe médio-latéral a révélé que les golfeurs experts présentent des limites de la stabilité posturale significativement plus grandes que les sujets non-athlètes sédentaires. Ce résultat concorde avec plusieurs études démontrant que la stabilité posturale debout est supérieure chez les athlètes élités dans plusieurs disciplines sportives (Neghaban et al. 2013; Tsang et Hui-Chang, 2010).

Une myriade d'études a démontré que les informations proprioceptives représentent la source d'information prépondérante pour le contrôle postural (Henry et Baudry, 2019). De plus, l'acuité proprioceptive des golfeurs serait supérieure au niveau du tronc et du genou (Glofcheskie et Brown, 2017; Tsang et Hui-Chan, 2010). Par conséquent, nous proposons que les plus grandes limites médio-latérales

des golfeurs élités, obtenues dans le contexte de cette tâche dynamique effectuée sans vision, reflètent une plus grande acuité proprioceptive et/ou une intégration plus efficace des informations proprioceptives consécutive à l'entraînement golfique. Cependant, étant donné que nous n'avons pas mesuré directement la proprioception dans la présente étude, c'est-à-dire dans une tâche proprioceptive ne comportant pas de composante motrice importante, il est impossible de déterminer si cette amélioration de la performance posturale reflète prioritairement une amélioration des sensations proprioceptives ou une amélioration plus générale de la fonction neuromusculaire.

De façon similaire, dans le contexte de cette tâche d'inclinaison maximale du corps dans différentes directions, nous ne pouvons pas exclure la possibilité que la pratique du golf ait également mené à une meilleure intégration des informations vestibulaires. De la même manière, étant donné que plusieurs études ont démontré que la force maximale à la cheville est un important prédicteur de la stabilité posturale (Melzer et al. 2009; Song et al. 2021), il est possible que l'amélioration de la stabilité posturale des golfeurs soit liée en partie à l'augmentation de la force à la cheville.

Nos résultats ont également révélé une tendance très intéressante. Les plus grandes limites de la stabilité médio-latérale des golfeurs élités sont, en moyenne, plus accentuées dans la direction d'inclinaison vers la gauche. Cependant, l'interaction entre les directions d'inclinaison et les groupes n'était pas significative ($p=0,08$). Ce résultat est probablement lié à la grande variabilité interindividuelle ainsi qu'à une puissance statistique insuffisante due à la petite taille de l'échantillon de sujets testés. Néanmoins, cette tendance intéressante, indiquant une latéralisation posturale, concorde avec l'hypothèse selon laquelle il y aurait un effet spécifique de la pratique du golf sur la performance proprioceptive et posturale. Il est important de souligner que la proportion de droitiers (golf) qui ont participé à notre recherche était plus importante que celle des gauchers (10/14). Lors de l'élan de golf, le golfeur expert droitier arrête son élan presque entièrement sur son pied gauche. Qui plus est, les athlètes terminent leur transfert de poids, initié par des mouvements de rotation à haute vitesse, sur la partie externe gauche de leur pied gauche. De ce fait, le centre de pression se retrouve sous la partie externe gauche du pied gauche. Il apparaît donc vraisemblable que les joueurs de golf droitiers présentent des limites de la stabilité posturale gauche étendue par rapport à des sujets témoins sédentaires.

Cette interprétation est alignée avec les résultats d'une étude récente portant sur la performance posturale et proprioceptive de golfeurs élités. Les chercheurs ont étudié la stabilité posturale de golfeurs collégiaux comparativement à des sujets témoins coureurs et des personnes sans expérience sportive dans une tâche de posture statique en position assise, le tronc à la verticale (Glofcheskie et Brown, 2017). Les

golfeurs élités ont démontré des déplacements antéropostérieurs et médio-latéraux significativement moins importants de leur COP que les non-sportifs. Cependant, ces déplacements étaient similaires entre les golfeurs et les coureurs. Dans la même étude, les participants devaient également effectuer une tâche proprioceptive dynamique de repositionnement de leur tronc à des angles cibles de 20, 40 et 60 degrés. Les golfeurs ont obtenu des erreurs d'appariement absolues significativement plus petites aux angles 20 et 40 degrés par rapport aux deux groupes témoins. Fait intéressant, il n'y avait pas de différence entre les groupes de coureurs et les sujets sans expérience sportive. Les chercheurs ont émis l'hypothèse que ce résultat pourrait être expliqué par la position de base du golfeur qui se situe à 30 degrés (Lindsay et Horton, 2002; Lindsay et al. 2002). Abordant très souvent cette même position durant la pratique, le golfeur présenterait une plus grande acuité proprioceptive au niveau du tronc aux angles qui s'y rapprochent (20 - 40 degrés). Ce résultat supporte l'hypothèse de la spécificité de la pratique sur la performance proprioceptive. Plusieurs autres études s'intéressant à la sensibilité proprioceptive à différentes articulations chez des athlètes de plusieurs disciplines sportives ont mené à une conclusion similaire (Soccer : Muaidi et al. 2008; volleyball : Sahin et al. 2015 et Sinsurin et al. 2013).

En accord avec les données de Glofcheskie et Brown (2017), nous proposons que le haut niveau de pratique des gestes golfeurs impliquant un élan et un transfert de poids mène au développement de plus grandes habiletés proprioceptives et de plus grandes limites de la stabilité posturale dans la direction du transfert de poids. En d'autres termes, l'entraînement des athlètes golfeurs droitiers exploite davantage les limites de la stabilité posturale gauche. Il s'agit même d'un critère de performance. Afin de demeurer en équilibre, le golfeur doit développer l'habileté à prolonger le mouvement de rotation et de transfert de poids, faisant en sorte qu'il termine son mouvement du côté externe de son pied gauche; à la limite maximale de sa stabilité posturale.

Dans cette perspective, le fait que quatre (4/14) des golfeurs élités testés dans cette étude n'étaient pas des golfeurs droitiers a vraisemblablement haussé la variabilité interindividuelle, réduisant la probabilité d'observer une différence statistiquement plus élevée entre les groupes pour les limites médio-latérales gauches en comparaison avec les limites droites. Dans cette étude, les sujets témoins étaient sédentaires et n'avaient pas d'expérience particulière en golf. Cependant, il est possible que certains d'entre eux aient une expérience antérieure dans une discipline sportive impliquant un transfert de poids le long de l'axe médio-latéral (ex. : baseball). Il est donc plausible qu'une telle expérience ait également représenté une source additionnelle de biais et variabilité dans l'évaluation des limites de la stabilité posturale. Des études futures évaluant les limites de la stabilité posturale chez des groupes de

golfeurs droitiers et gauchers de haut niveau en comparaison à des sujets témoins actifs, mais qui ne présentent pas d'expérience sportive dans une discipline impliquant un transfert de poids latéralisé, permettraient de tester cette hypothèse plus directement.

6.2.2 – Condition de tâche double

La vie de tous les jours implique de nombreuses situations durant lesquelles une tâche posturale est effectuée simultanément à une tâche cognitive (ex. : parler au téléphone). Ces situations de tâche double représentent une approche efficace pour évaluer la demande attentionnelle du contrôle postural (Boisgontier et al. 2013). Une multitude de recherches ont examiné la demande attentionnelle de la stabilité posturale dans une variété de contextes expérimentaux chez diverses populations. Ces recherches ont rapporté une hausse du coût attentionnel liée à l'augmentation de la complexité de la tâche posturale, à l'augmentation de la difficulté de la tâche cognitive ou encore à la détérioration du système sensorimoteur chez la personne âgée ou présentant une maladie neurologique (Boisgontier et al. 2013, Ruffieux et al. 2015, Henry et Beaudry 2019; Salihu et al. 2022).

À ce jour, de nombreuses études ont souligné que l'entraînement dans une discipline sportive permet d'améliorer l'acuité et l'efficacité des processus de traitement et d'intégration des informations sensorielles multimodales pour le contrôle de la posture. Reste à savoir si la pratique spécialisée des athlètes élités permet de diminuer la charge attentionnelle du contrôle postural.

Une seule étude a investigué, de façon systématique, si la demande attentionnelle du contrôle postural peut être diminuée lorsque le niveau de compétence d'un individu est très élevé dans une tâche donnée comme chez les athlètes d'élite (Sirois-Leclerc et al. 2017). Cette étude récente a évalué si la demande attentionnelle du contrôle posturale dynamique d'un groupe de danseurs expérimentés est inférieure à celle d'un groupe témoin non-danseurs en raison de leur entraînement spécialisé qui implique le contrôle de la posture et de l'équilibre. Les participants devaient effectuer une tâche complexe de poursuite posturale. Leur centre de pression et une cible étaient représentés sur un écran. Les participants devaient effectuer des ajustements posturaux afin que leur COP suive cette cible le plus précisément possible. Deux tâches secondaires attentionnelles ont été utilisées : une tâche de temps de réaction simple (facile) et une tâche de réaction à choix (difficile). Les danseurs experts ont montré une meilleure habileté à contrôler les mouvements médio-latéraux (ML) et antéropostérieurs (AP) de leur COP dans la condition

de tâche simple ainsi que dans la condition de tâche double avec la tâche cognitive facile. Ce résultat suggère que l'entraînement en danse améliore la capacité d'effectuer une tâche posturale simultanément à une tâche cognitive. Cependant, les danseurs ont détérioré leur performance lors de la condition de tâche double difficile. Ce résultat suggère que, même chez les danseurs très expérimentés, le contrôle de la posture dynamique mobilise une proportion des ressources attentionnelles.

À notre connaissance, la présente étude est la première à investiguer la demande attentionnelle du contrôle postural dynamique chez les golfeurs élités. Nos résultats ont montré que les non-athlètes sédentaires et les golfeurs élités présentaient des limites de la stabilité posturale médio-latérale significativement plus petites lors de la condition de tâche double en comparaison à la condition de tâche simple. Ce résultat suggère que, même chez les golfeurs élités, le contrôle de cette tâche posturale dynamique comporte une demande attentionnelle. Les analyses ont également révélé une interaction significative entre la direction de l'inclinaison et la condition cognitive. La détérioration des limites de la stabilité posturale gauche était plus importante que la diminution observée pour les limites droites. Qui plus est, cette détérioration de la taille des limites gauches était, en moyenne, plus importante chez les sujets témoins que chez les golfeurs. En accord avec cette dernière observation, le coût attentionnel de la tâche posturale sur les limites de la stabilité posturale gauche a montré une différence de moyenne notable, mais non significative entre les groupes ($p=0,058$). Des analyses futures détaillées des latéralisations posturales dans les sports impliquant des transferts de poids pour les sujets témoins permettaient de mieux comprendre cet effet. Cependant, il paraît vraisemblable que les plus grandes limites gauches observées chez les golfeurs élités ont impliqué une meilleure allocation des ressources attentionnelles. Nous reviendrons sur ce point plus loin.

De la même manière qu'au coût attentionnel de la tâche posturale, l'analyse du coût attentionnel de la tâche cognitive a révélé un coût moyen plus élevé chez les non-athlètes sédentaires en comparaison aux golfeurs élités. Cependant, cette différence ne s'est pas avérée statistiquement significative. Ce résultat suggère que l'ajout de la tâche cognitive n'a pas permis d'extraire entièrement les ressources attentionnelles du contrôle postural et que les deux groupes de participants ont donc partagé ce coût attentionnel entre la tâche posturale et cognitive. Néanmoins, l'observation que les coûts attentionnels moyens de la tâche posturale (à gauche) et de la tâche cognitive soient plus élevés chez les non-athlètes sédentaires et très près du niveau de signification statistique, suggère que cette condition de tâche double a engagé un coût attentionnel total plus élevé chez les non-athlètes sédentaires que chez les golfeurs élités.

L'observation d'une détérioration partielle des performances posturales et cognitives suggère plutôt que les participants sédentaires n'ont pas utilisé de stratégie de priorisation de l'une ou l'autre des tâches expérimentales. Il est important de mentionner qu'aucune instruction de priorisation de tâche n'avait été donnée aux participants. Qui plus est, étant donné que tous les sujets de cette étude étaient de jeunes adultes en santé, aucun des participants n'a rapporté une peur de chuter qui pourrait avoir mené à une priorisation de la tâche posturale. Nos résultats concordent donc avec l'idée que les participants sédentaires ont distribué les ressources attentionnelles entre le contrôle postural et la tâche cognitive. Des analyses ultérieures du coût attentionnel total permettront de confirmer cette hypothèse. De plus, des études ultérieures, dans lesquelles des instructions précises sont données aux sujets concernant la stratégie de priorisation, par exemple une priorisation de la tâche cognitive, permettrait de rehausser la sensibilité de ce paradigme de double tâche (Goble et al. 2012).

L'observation que les golfeurs ont obtenu un coût attentionnel moyen de la limite de stabilité posturale gauche inférieur aux sujets témoins, alors que la taille de leurs limites gauches était significativement plus grande, pourrait refléter le fait que l'entraînement golfique permet de contrôler la stabilité posturale et le transfert de poids de façon plus automatique. Ainsi, le golfeur élite pourrait optimalement diriger des ressources attentionnelles vers l'analyse des informations visuospatiales nécessaires pour frapper la balle en direction de la cible. Vuillerme et Nougier (2004) ont également noté une diminution des exigences attentionnelles associées au contrôle postural lorsqu'un athlète d'élite (gymnaste) est plus compétent dans une tâche donnée. Cette hypothèse intéressante pourrait être évaluée en comparant la demande attentionnelle de golfeurs élités droitiers et gauchers qui présentent différents niveaux d'expertise.

Dans la même veine, une étude récente a démontré que les golfeurs élités dépendent moins des informations visuelles pour le contrôle de la stabilité posturale (Micarelli et al. 2019). Les chercheurs ont proposé que les golfeurs expérimentés présentent une meilleure capacité à utiliser les ressources sensorimotrices afin d'assurer le succès de la performance golfique. Les golfeurs experts utiliseraient un poids supérieur aux signaux proprioceptifs et vestibulaires pour le contrôle de la stabilité posturale afin de diriger leur attention visuelle vers les éléments visuospatiaux importants de la performance golfique. Des études futures sont nécessaires afin de clarifier la relation entre l'intégration des informations sensorielles multimodales, les ressources attentionnelles et la performance golfique.

6.3 - Les limites de l'étude

Dans la présente étude, nous avons exploité le paradigme de double tâche afin d'investiguer le contrôle proprioceptif et la demande attentionnelle de la performance proprioceptive de golfeurs élités dans le contexte d'une tâche d'atteintes manuelles tridimensionnelle, d'une tâche de stabilité posturale dynamique et d'une tâche cognitive de soustraction mathématique. Nos résultats ont permis d'identifier plusieurs différences significatives et plusieurs tendances très intéressantes entre les conditions attentionnelles et les groupes de participants. Ces résultats suggèrent que nos tâches expérimentales sont des prédicteurs sensibles de la performance sensorimotrice et attentionnelle de l'athlète d'élite. Cependant, certaines limitations de la présente étude pourraient avoir eu un impact sur nos résultats.

Premièrement, la tâche cognitive attentionnelle utilisée dans cette étude pourrait ne pas être suffisamment difficile pour produire une détérioration plus importante de la performance motrice et/ou de la performance cognitive en condition de tâche double, tout particulièrement lors de la tâche de stabilité posturale. Plusieurs études ont démontré que la complexité de la tâche cognitive influence la performance en condition de tâche double (Salihu et al. 2022). Le niveau de complexité de la tâche cognitive pourrait être rehaussé soit en augmentant la fréquence et le nombre des réponses à produire ou en augmentant la difficulté de la soustraction mathématique ($n-7$). Cela permettrait de forcer un engagement plus important et continu des ressources attentionnelles durant la performance motrice et ainsi augmenter la sensibilité de ce paradigme de double tâche.

Deuxièmement, des études futures devraient investiguer une plus grande population d'athlètes élités. Les résultats de cette étude ne peuvent donc pas être généralisés à l'ensemble des golfeurs élités en raison du petit nombre de participants. Cette taille a vraisemblablement eu un impact sur la puissance de nos analyses statistiques, puisque certaines des tendances intéressantes observées n'ont pas atteint le seuil de signification.

Finalement, un autre facteur important qui pourrait avoir influencé les résultats est la période de l'année durant laquelle l'acquisition des données a été effectuée chez les golfeurs élités. En effet, la collecte de données a été effectuée durant la saison « morte » ou inactive de ce groupe d'athlètes (mars à avril). Par conséquent, les golfeurs n'étaient pas en phase intensive d'entraînement golfique ni au sommet de leur performance au moment de l'évaluation. Or, certaines adaptations sensorimotrices

pourraient être substantiellement rehaussées pendant la saison active de golf lorsque l'athlète joue régulièrement et que sa performance est au sommet (Dickson et al. 2021).

6.4 – Les futures analyses

De futures analyses seront effectuées sur les composantes des erreurs absolues et variables d'atteintes manuelles. Comme mentionné précédemment, la décomposition des erreurs 3D en erreurs commises le long des axes horizontal, sagittal et vertical permettrait de raffiner l'évaluation de l'effet de l'entraînement sur la proprioception et la demande attentionnelle du guidage proprioceptif des mouvements dans un environnement 3D.

Des analyses plus détaillées des trajectoires d'atteintes manuelles des deux groupes de participants dans les deux conditions cognitives permettront d'adresser comment l'entraînement golfique modifie les mécanismes de contrôle des mouvements du bras dirigés vers une cible 3D. De façon plus spécifique, l'analyse de la précision et de la variabilité spatiale à différents instants durant le mouvement (ex. : au sommet d'accélération, de vitesse et à la fin du mouvement) permettra de déterminer si l'entraînement golfique améliore prioritairement les processus de planification ou de contrôle de la performance proprioceptivo-motrice (Messier et al. 1999; Mongeon et al. 2015). De la même manière, des analyses détaillées des ajustements posturaux qui prennent place avant d'inclinaison du corps (ajustements anticipés) et durant le maintien des limites de la stabilité posturale permettront de mieux comprendre les stratégies de contrôle postural utilisées par les golfeurs experts.

Finalement, l'impact du niveau d'excellence des golfeurs sera approfondi afin de déterminer si l'indice de performance du golfeur et le handicap représentent des prédicteurs de la performance proprioceptive des golfeurs élités.

6.5 – Les futures études

Afin de déterminer si la meilleure performance posturale des athlètes élités est associée prioritairement à une augmentation de l'acuité proprioceptive consécutive à l'entraînement au golf, nous prévoyons évaluer la sensibilité proprioceptive à la cheville chez des athlètes golfeurs.

Des analyses des performances des golfeurs dans un protocole d'appariement d'angle à la cheville pourraient renforcer nos conclusions. Les protocoles à la cheville sont ceux les plus utilisés dans la littérature alors que le contrôle postural dépend prioritairement de la sensibilité proprioceptive à cette articulation (Yasuda et al. 2014; Jacobs et Horak, 2006; Lord et al. 1999; Fitzpatrick et al. 1994; Lord et al. 1991; Diener et al. 1984).

Étant donné que ces tests proprioceptifs sont effectués en position assise la tête immobile et les yeux fermés, ce test à la cheville permettra d'extraire la contribution des signaux vestibulaires. De plus, ce protocole permettra de minimiser les impacts potentiels des adaptations du système neuromusculaire spécifiques à la posture ainsi que la contribution de la force à la cheville qui représentait un facteur confondant dans la présente étude. En outre, nos études ultérieures sur la stabilité posturale chez les athlètes incluront des mesures de force maximale à la cheville afin de mieux comprendre l'interaction entre la proprioception et la force à la cheville et la performance posturale dynamique. Idéalement, ces expérimentations auraient lieu pendant la haute saison des golfeurs. Nous serions ainsi en mesure de vérifier si le volume d'entraînement contribue à l'augmentation des sensations proprioceptives chez le golfeur.

Des études ultérieures pourraient également comparer la performance dans ces différentes tâches expérimentales entre des athlètes de disciplines sportives variées qui présentent un niveau de condition physique équivalent. Ainsi, il serait possible de dissocier les effets du niveau d'activité physique de l'effet spécifique de la pratique golfique. Par exemple, une étude a montré que la pratique régulière du Tai-Chi et du golf permet d'améliorer la stabilité posturale et la sensibilité proprioceptive au genou des personnes âgées (Tsang et Hui-Chan, 2004). Étant donné que le golf est une activité sportive très populaire chez les personnes âgées en santé, une analyse détaillée des bénéfices du golf sur le contrôle du mouvement, la stabilité posturale et les risques de chutes pourrait comporter des implications très importantes pour le bien vieillir. Dans cette perspective, la pratique du golf pourrait faire partie d'une liste d'activités motrices et cognitives qui permettent de lutter contre les effets délétères du vieillissement.

Conclusion

Notre étude est originale et importante. Elle est la première étude à investiguer, de façon systématique, le contrôle proprioceptif et la demande attentionnelle de la performance proprioceptive de golfeurs élités dans le contexte d'une tâche d'atteintes manuelles tridimensionnelles et d'une tâche de stabilité posturale dynamique. Nos résultats démontrent que les golfeurs élités présentent une meilleure capacité que les non-athlètes sédentaires à effectuer des mouvements d'atteinte manuelle très répétables au cours des essais successifs. Par ailleurs, les mouvements des golfeurs experts sont associés à une demande attentionnelle significativement moins importante. Ces résultats suggèrent que les golfeurs utilisent un traitement plus efficace et automatique des informations proprioceptives pour guider les mouvements des membres supérieurs. Les analyses posturales démontrent que les limites médio-latérales de la stabilité posturale sont plus grandes chez les golfeurs élités. Ce résultat suggère que la pratique du golf est associée à une meilleure stabilité posturale et possiblement des signaux proprioceptifs plus précis au niveau des membres inférieurs. Les golfeurs ont aussi tendance à diriger moins de ressources attentionnelles vers le contrôle postural que les non-athlètes sédentaires. Cette tendance doit cependant être confirmée par des analyses et des études ultérieures. Ensemble, ces observations démontrent que la pratique golfique permet le développement de stratégies de contrôle plus efficaces et diminue les exigences attentionnelles du contrôle du mouvement. Des études longitudinales chez des populations de golfeurs novices et de golfeurs âgés permettront de déterminer si ces paradigmes de double tâche complexes peuvent être utilisés comme marqueurs afin d'évaluer l'évolution des stratégies de contrôle durant la progression de la performance golfique. De façon importante, ces recherches permettraient de cibler les bénéfices de la pratique du golf afin de diminuer les effets délétères du vieillissement sur la santé sensorimotrice et les risques de chute.

Bibliographie

- Adamo, D. E., et al. (2007). "Age-related differences in upper limb proprioceptive acuity." Percept Mot Skills **104**(3 Pt 2): 1297-1309.
- Adamovich, S. V., et al. (1998). "Pointing in 3D space to remembered targets. I. Kinesthetic versus visual target presentation." J Neurophysiol **79**(6): 2833-2846.
- Adamovich, S. V., et al. (2001). "The interaction of visual and proprioceptive inputs in pointing to actual and remembered targets in Parkinson's disease." Neuroscience **104**(4): 1027-1041.
- Allegrucci, M., et al. (1995). "Shoulder kinesthesia in healthy unilateral athletes participating in upper extremity sports." J Orthop Sports Phys Ther **21**(4): 220-226.
- Andreeva, A., et al. (2021). "Postural stability in athletes: The role of sport direction." Gait Posture **89**: 120-125.
- Ashton-Miller JA, Wojtys EM, Huston LJ, Fry-Welch D. (2001). "Can proprioception really be improved by exercises?" Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc **9**:128–36.
- Baddeley, A. D. and G. Hitch (1974). Working Memory. Psychology of Learning and Motivation. G. H. Bower, Academic Press. **8**: 47-89.
- Baudry, S. and J. Duchateau (2020). "Aftereffects of prolonged Achilles tendon vibration on postural control are reduced in older adults." Exp Gerontol **131**: 110822.
- Bernstein D, Nash P. (2008). "Essentials of psychology." 4th ed. Boston, MA: Houghton-Mifflin.
- Beynonn BD, Ryder SH, Konradsen L, Johnson RJ, Johnson K, Renstrom PA. (1999). "The effect of anterior cruciate ligament trauma and bracing on knee proprioception." Am J Sports Med **27**:150–5.
- Bishop, D. T., et al. (2017). "Using visual guidance to retrain an experienced golfer's gaze: A case study." Eur J Sport Sci **17**(2): 160-167.
- Blanchet, M., et al. (2014). "Postural stability limits in manifest and premanifest Huntington's disease under different sensory conditions." Neuroscience **279**: 102-112.
- Boisgontier, M. et al. (2013). "Age-related differences in attentional cost associated with postural dual tasks: increased recruitment of generic cognitive resources in older adults." Neuroscience and biobehavioral reviews, **37**(8): 1824–1837.
- Boisgontier, M. P. and V. Nougier (2013). "Ageing of internal models: from a continuous to an intermittent proprioceptive control of movement." AGE **35**(4): 1339-1355.
- Bruyneel, A. V., et al. (2010). "Organization of postural equilibrium in several planes in ballet dancers." Neurosci Lett **485**(3): 228-232.
- Cameron M, Adams R. (2003). "Kicking footedness and movement discrimination by elite Australian Rules footballers." J Sci Med Sport **6**:266– 74.
- Collins, D. F. and A. Prochazka (1996). "Movement illusions evoked by ensemble cutaneous input from the dorsum of the human hand." J Physiol **496 (Pt 3)** (Pt 3): 857-871.
- Cordo, P. J. (1990). "Kinesthetic control of a multijoint movement sequence." J Neurophysiol **63**(1): 161-172.
- Cosgrove, J., et al. (2021). "Significant cognitive decline in Parkinson's disease exacerbates the reliance on visual feedback during upper limb reaches." Neuropsychologia **157**: 107885.
- Cremer, R. and E. J. Zeef (1987). "What kind of noise increases with age?" J Gerontol **42**(5): 515-518.
- Della Sala, S., et al. (1995). "Dual-task paradigm: a means to examine the central executive." Ann N Y Acad Sci **769**: 161-171.
- Dickson, T. J., et al. (2021). "Proprioceptive abilities improve in expert skiers and snowboarders from early-season to mid-season." J Sci Med Sport **24**(10): 1021-1025.

- Diener, H. C., et al. (1984). "The significance of proprioception on postural stabilization as assessed by ischemia." Brain Res **296**(1): 103-109.
- Diener, H. C., et al. (1988). "Influence of stimulus parameters on human postural responses." J Neurophysiol **59**(6): 1888-1905.
- Doumas, M., et al. (2008). "Task prioritization in aging: effects of sensory information on concurrent posture and memory performance." Experimental Brain Research **187**(2): 275-281.
- Doumas, M., et al. (2009). "Working Memory and Postural Control: Adult Age Differences in Potential for Improvement, Task Priority, and Dual Tasking." The Journals of Gerontology: Series B **64B**(2): 193-201.
- Edin, B. (2001). "Cutaneous afferents provide information about knee joint movements in humans." J Physiol **531**(Pt 1): 289-297.
- Elangovan, N., et al. (2014). "Assessing Proprioceptive Function: Evaluating Joint Position Matching Methods Against Psychophysical Thresholds." Physical Therapy **94**(4): 553-561.
- Fitzpatrick, R. and D. I. McCloskey (1994). "Proprioceptive, visual and vestibular thresholds for the perception of sway during standing in humans." J Physiol **478** (Pt 1)(Pt 1): 173-186.
- Flament, D, Ellermann, J M, Kim, S-G, Ugurbil, K and Ebner, T J (1996). "Functional magnetic resonance imaging of cerebellar activation during the learning of a visuomotor dissociation task" Human Brain Mapping **4**:210-226.
- Fleury, A. et al. (2018). "Assessment of attention demand for balance control using a Smartphone: implementation and evaluation." Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual International Conference, 2018, 5598–5601.
- Forget, R. and Y. Lamarre (1987). "Rapid elbow flexion in the absence of proprioceptive and cutaneous feedback." Hum Neurobiol **6**(1): 27-37.
- Fowles, J. R., et al. (2017). "A pilot study: Validity and reliability of the CSEP-PATH PASB-Q and a new leisure time physical activity questionnaire to assess physical activity and sedentary behaviours." Appl Physiol Nutr Metab **42**(6): 677-680.
- Ghez, C., et al. (1990). "Roles of proprioceptive input in the programming of arm trajectories." Cold Spring Harb Symp Quant Biol **55**: 837-847.
- Glover, S., (2005). "A hierarchical model of the cognitive penetrability of actions". Raftopoulos, A. (Ed.), Cognitive Penetrability of Perception. Nova Science Publishers. New York. pp. 193–208.
- Glofcheskie, G. O. and S. H. Brown (2017). "Athletic background is related to superior trunk proprioceptive ability, postural control, and neuromuscular responses to sudden perturbations." Hum Mov Sci **52**: 74-83.
- Goble, D. J., et al. (2009). "Proprioceptive sensibility in the elderly: degeneration, functional consequences and plastic-adaptive processes." Neurosci Biobehav Rev **33**(3): 271-278.
- Goble, D. J., et al. (2012). "Compromised encoding of proprioceptively determined joint angles in older adults: the role of working memory and attentional load." Exp Brain Res **216**(1): 35-40.
- Goble, D. J. and J. A. Anguera (2010). "Plastic changes in hand proprioception following force-field motor learning." J Neurophysiol **104**(3): 1213-1215.
- Gordon, J., et al. (1995). "Impairments of reaching movements in patients without proprioception. I. Spatial errors." J Neurophysiol **73**(1): 347-360.
- Granacher, U., et al. (2011). "An intergenerational approach in the promotion of balance and strength for fall prevention - a mini-review." Gerontology **57**(4): 304-315.
- Gray, R. (2004). "Attending to the execution of a complex sensorimotor skill: expertise differences, choking, and slumps." J Exp Psychol Appl **10**(1): 42-54.
- Guo LY, Yang CP, You YL, Chen SK, Yang CH, Hou YY, et al. (2014). "Underlying mechanisms of Tai-Chi-Chuan training for improving balance ability in the elders." Chin J Integr Med **20**:409–15.
- Han J, Anson J, Waddington G, Adams R (2014). "Sport attainment and proprioception." Int J Sports Sci Coach **9**:159–70.

- Han J, Waddington G, Adams R, Anson J. (2014). "A proprioceptive ability underlying all proprioception tests? Response to tremblay." Percept Mot Skills 119:301–4.
- Han, J., et al. (2015). "Level of competitive success achieved by elite athletes and multi-joint proprioceptive ability." J Sci Med Sport 18(1): 77-81.
- Han, J., et al. (2015). "The Role of Ankle Proprioception for Balance Control in relation to Sports Performance and Injury." Biomed Res Int 2015: 842804.
- Han, J., et al. (2016). "Assessing proprioception: A critical review of methods." Journal of sport and health science, 5(1), 80–90.
- Hass, C. J., et al. (2005). "Gait initiation and dynamic balance control in Parkinson's disease." Arch Phys Med Rehabil 86(11): 2172-2176.
- Henry, M., & Baudry, S. (2019). "Age-related changes in leg proprioception: implications for postural control." Journal of neurophysiology, 122(2), 525–538.
- Honeycutt CF, Gottschall JS, Nichols TR. (2009). "Electromyographic responses from the hindlimb muscles of the decerebrate cat to horizontal support surface perturbations." J Neurophysiol.;101(6):2751-2761.
- Horváth, Á., et al. (2022). "The measurement of proprioceptive accuracy: A systematic literature review." J Sport Health Sci.
- Hrysomallis, C. (2011). "Balance ability and athletic performance." Sports Med 41(3): 221-232.
- Huxhold, O., et al. (2006). "Dual-tasking postural control: aging and the effects of cognitive demand in conjunction with focus of attention." Brain Res Bull 69(3): 294-305.
- Ingram, H. A., et al. (2000). "The role of proprioception and attention in a visuomotor adaptation task." Exp Brain Res 132(1): 114-126.
- Jacobs, J. V., et al. (2005). "Can stooped posture explain multidirectional postural instability in patients with Parkinson's disease?" Exp Brain Res 166(1): 78-88.
- Jacobs, J. V. and F. B. Horak (2006). "Abnormal proprioceptive-motor integration contributes to hypometric postural responses of subjects with Parkinson's disease." Neuroscience 141(2): 999-1009.
- Jacobs, J. V. and F. B. Horak (2007). "Cortical control of postural responses." J Neural Transm (Vienna) 114(10): 1339-1348.
- Janwantanakul P, Magarey ME, Jones MA, Dansie BR. (2001). "Variation in shoulder position sense at mid and extreme range of motion." Arch Phys Med Rehabil 82:840–4.
- Jenkins, I, Brooks, D J, Nixon, P D, Frackowiak, R S J and Passingham, R E (1994). "Motor sequence learning: A study with positron emission tomography" Journal of Neuroscience 14:3775-90.
- Kail, R. (1997) "The neural noise hypothesis: evidence from processing speed in adults with multiple sclerosis." Aging Neuropsychology and Cognitio. 4:3, 157-165.
- Kawato, M. (1999). "Internal models for motor control and trajectory planning." Curr Opin Neurobiol 9(6): 718-727.
- Kawato, M. and D. Wolpert (1998). "Internal models for motor control." Novartis Found Symp 218: 291-304; discussion 304-297.
- Lajoie, Y., et al. (1993). "Attentional demands for static and dynamic equilibrium." Exp Brain Res 97(1): 139-144.
- Lajoie, Y., et al. (1996). "Upright standing and gait: are there changes in attentional requirements related to normal aging?" Exp Aging Res 22(2): 185-198.
- Larsen R, Lund H, Christensen R, Rogind H, Danneskiold-Samsøe B, Bliddal H. (2005). "Effect of static stretching of quadriceps and hamstring muscles on knee joint position sense." Br J Sports Med 39:43–6.
- Laszlo, J. I. (1992). Chapter 2 Motor Control and Learning: How Far Do the Experimental Tasks Restrict Our Theoretical Insight? Advances in Psychology. J. J. Summers, North-Holland. 84: 47-79.
- Leach, J. M., et al. (2018). "Day-to-Day Variability of Postural Sway and Its Association With Cognitive Function in Older Adults: A Pilot Study." Front Aging Neurosci 10: 126.

- Lee HM, Liao JJ, Cheng CK, Tan CM, Shih JT. (2003). "Evaluation of shoulder proprioception following muscle fatigue." Clin Biomech 18:843–7.
- Lefrançois, C. and J. Messier (2019). "Adaptation and spatial generalization to a triaxial visuomotor perturbation in a virtual reality environment." Exp Brain Res 237(3): 793-803. Lephart SM, Fu FH. (2000). "Proprioception and neuromuscular control in joint stability." Champaign, IL: Human Kinetics.
- Lephart, S. M., et al. (1996). "Knee joint proprioception: a comparison between female intercollegiate gymnasts and controls." Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 4(2): 121-124.
- Lephart SM, Warner JJ, Borsa PA, Fu FH. (1994). "Proprioception of the shoulder joint in healthy, unstable, and surgically repaired shoulders." J Shoulder Elbow Surg 3:371–80.
- Li, K. Z. H., et al. (2018). "Cognitive Involvement in Balance, Gait and Dual-Tasking in Aging: A Focused Review From a Neuroscience of Aging Perspective." Front Neurol 9: 913.
- Lindsay, D. M., et al. (2002). "Trunk Motion of Male Professional Golfers Using Two Different Golf Clubs %J Journal of Applied Biomechanics." 18(4): 366-373.
- Lindsay, D. and J. Horton (2002). "Comparison of spine motion in elite golfers with and without low back pain." J Sports Sci 20(8): 599-605.
- Lord, S. R., et al. (1991). "Physiological factors associated with falls in an elderly population." J Am Geriatr Soc 39(12): 1194-1200.
- Lord, S. R., et al. (1999). "Lateral stability, sensorimotor function and falls in older people." J Am Geriatr Soc 47(9): 1077-1081.
- Mancini, M., et al. (2008). "Effects of Parkinson's disease and levodopa on functional limits of stability." Clin Biomech (Bristol, Avon) 23(4): 450-458.
- McKay, A. K. A., et al. (2022). "Defining Training and Performance Caliber: A Participant Classification Framework." Int J Sports Physiol Perform 17(2): 317-331.
- Melzer, I., et al. (2009). "Association between ankle muscle strength and limit of stability in older adults." Age Ageing 38(1): 119-123.
- Mergner, T. and T. Rosemeier (1998). "Interaction of vestibular, somatosensory and visual signals for postural control and motion perception under terrestrial and microgravity conditions--a conceptual model." Brain Res Brain Res Rev 28(1-2): 118-135.
- Messier, J. and J. F. Kalaska (1999). "Comparison of variability of initial kinematics and endpoints of reaching movements." Exp Brain Res 125(2): 139-152.
- Messier, J., et al. (2003). "Influence of movement speed on accuracy and coordination of reaching movements to memorized targets in three-dimensional space in a deafferented subject." Exp Brain Res 150(4): 399-416.
- Micarelli, A., et al. (2019). "Visual dependency and postural control on swing performance in golf players." Eur J Sport Sci 19(7): 922-930.
- Mongeon, D., Blanchet P.J, Messier J. (2009). "Impact of Parkinson's disease and dopaminergic medication on proprioceptive processing." Neuroscience 158(2): 426-440.
- Mongeon D, Blanchet P, Bergeron S, Messier J. "Impact of Parkinson's disease on proprioceptively based on-line movement control." Exp Brain Res. 2015;233(9):2707-2721.
- Mouthon, A., et al. (2018). "Age-Related Differences in Cortical and Subcortical Activities during Observation and Motor Imagery of Dynamic Postural Tasks: An fMRI Study." Neural Plast 2018: 1598178.
- Mozolic, J. L., et al. (2012). Frontiers in Neuroscience. Multisensory Integration and Aging. The Neural Bases of Multisensory Processes. M. M. Murray and M. T. Wallace. Boca Raton (FL), CRC Press/Taylor & Francis. Copyright © 2012 by Taylor & Francis Group, LLC.
- Muaidi, Q. I., et al. (2009). "Do elite athletes exhibit enhanced proprioceptive acuity, range and strength of knee rotation compared with non-athletes?" Scand J Med Sci Sports 19(1): 103-112.

- Negahban, H., et al. (2013). "Effect of expertise in shooting and Taekwondo on bipedal and unipedal postural control isolated or concurrent with a reaction-time task." Gait Posture **38**(2): 226-230.
- Newton, R. A. (2001). "Validity of the multi-directional reach test: a practical measure for limits of stability in older adults." J Gerontol A Biol Sci Med Sci **56**(4): M248-252.
- Nodehi-Moghadam, A., et al. (2013). "A Comparative Study on Shoulder Rotational Strength, Range of Motion and Proprioception between the Throwing Athletes and Non-athletic Persons." Asian J Sports Med **4**(1): 34-40.
- Okuda, I., et al. (2010). "Trunk Rotation and Weight Transfer Patterns between Skilled and Low Skilled Golfers." J Sports Sci Med **9**(1): 127-133.
- Paillard, T. (2022). "Neuromuscular or Sensory Electrical Stimulation for Reconditioning Motor Output and Postural Balance in Older Subjects?" Front Physiol **12**: 779249.
- Patton, J. L., et al. (1999). "Evaluation of a model that determines the stability limits of dynamic balance." Gait Posture **9**(1): 38-49.
- Peterka, R. J. (2002). "Sensorimotor integration in human postural control." J Neurophysiol **88**(3): 1097-1118.
- Poizner, H. and M. Kritchewsky (1991). "Three-dimensional trajectory analysis of congenital mirror movements in a single subject." Percept Mot Skills **73**(2): 447-466.
- Preatoni, E., et al. (2013). "Movement variability and skills monitoring in sports." Sports Biomech **12**(2): 69-92.
- Proske, U. (2006). "Kinesthesia: the role of muscle receptors." Muscle Nerve **34**(5): 545-558.
- Proske, U. and Gandevia, S.C. (2009). "The kinaesthetic senses." The Journal of Physiology. 587: 4139-4146.
- Proske, U. and S. C. Gandevia (2012). "The Proprioceptive Senses: Their Roles in Signaling Body Shape, Body Position and Movement, and Muscle Force." Physiological Reviews **92**(4): 1651-1697.
- Rapp, M. A., et al. (2006). "Adaptive Task Prioritization in Aging: Selective Resource Allocation to Postural Control Is Preserved in Alzheimer Disease." The American Journal of Geriatric Psychiatry **14**(1): 52-61.
- Riemann, B. L. and S. M. Lephart (2002). "The sensorimotor system, part I: the physiologic basis of functional joint stability." J Athl Train **37**(1): 71-79.
- Rein, S., et al. (2011). "Postural control and functional ankle stability in professional and amateur dancers." Clin Neurophysiol **122**(8): 1602-1610.
- Ribeiro F, Oliveira J. (2011). "Factors influencing proprioception: what do they reveal?" Klika V, editor. Biomechanics in applications Rijeka: InTech.
- Rocchi, L., et al. (2006). "Identification of distinct characteristics of postural sway in Parkinson's disease: a feature selection procedure based on principal component analysis." Neurosci Lett **394**(2): 140-145.
- Rothwell, J. C., et al. (1982). "Manual motor performance in a deafferented man." Brain **105 (Pt 3)**: 515-542.
- Ruffieux, J., et al. (2015). "Changes in Standing and Walking Performance Under Dual-Task Conditions Across the Lifespan." Sports Med **45**(12): 1739-1758.
- Şahin, N., et al. (2015). "Evaluation of knee joint proprioception and balance of young female volleyball players: a pilot study." J Phys Ther Sci **27**(2): 437-440.
- Sainburg RL, Poizner H, Ghez C. (1993). "Loss of proprioception produces deficits in interjoint coordination." J Neurophysiol; **70**(5):2136-2147.
- Salihi, A. T., et al. (2022). "Effect of cognitive task complexity on dual task postural stability: a systematic review and meta-analysis." Exp Brain Res **240**(3): 703-731.
- Sanes, J. N. (1985). "Information processing deficits in Parkinson's disease during movement." Neuropsychologia **23**(3): 381-392.
- Schaffer, J. E., et al. (2021). "A rare case of deafferentation reveals an essential role of proprioception in bilateral coordination." Neuropsychologia **160**: 107969.

- Schaefer, S. (2014). "The ecological approach to cognitive-motor dual-tasking: findings on the effects of expertise and age." Front Psychol **5**: 1167.
- Schneider, W. and J. M. Chein (2003). "Controlled & automatic processing: behavior, theory, and biological mechanisms." Cognitive Science **27**(3): 525-559.
- Schneider, W. and R. M. Shiffrin (1977). "Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search, and attention." Psychological Review **84**: 1-66.
- Sirois-Leclerc, G., Remaud, A., & Bilodeau, M. (2017). "Dynamic postural control and associated attentional demands in contemporary dancers versus non-dancers." PloS one, *12*(3), e0173795.
- Shumway-Cook, A., et al. (1997). "The effects of two types of cognitive tasks on postural stability in older adults with and without a history of falls." J Gerontol A Biol Sci Med Sci **52**(4): M232-240.
- Shumway-Cook, A. and M. Woollacott (2000). "Attentional demands and postural control: the effect of sensory context." J Gerontol A Biol Sci Med Sci **55**(1): M10-16.
- Sinsurin, K., et al. (2013). "Different Sagittal Angles and Moments of Lower Extremity Joints during Single-leg Jump Landing among Various Directions in Basketball and Volleyball Athletes." J Phys Ther Sci **25**(9): 1109-1113.
- Smetacek V, Mechsner F. (2004). Making sense. Nature 432:21.
- Smith, M. D. and C. J. Chamberlin (1992). "Effect of adding cognitively demanding tasks on soccer skill performance." Percept Mot Skills **75**(3 Pt 1): 955-961.
- Speers, R. A., et al. (2002). "Contributions of altered sensation and feedback responses to changes in coordination of postural control due to aging." Gait Posture **16**(1): 20-30.
- Stins, J. F. and P. J. Beek (2012). "A critical evaluation of the cognitive penetrability of posture." Exp Aging Res **38**(2): 208-219.
- Stillman, B. C. (2002). "Making Sense of Proprioception: The meaning of proprioception, kinaesthesia and related terms." Physiotherapy **88**(11): 667-676.
- Song, Q., et al. (2021). "Relationship of proprioception, cutaneous sensitivity, and muscle strength with the balance control among older adults." J Sport Health Sci **10**(5): 585-593.
- Sweeney, M., et al. (2013). "The influence of club-head kinematics on early ball flight characteristics in the golf drive." Sports Biomech **12**(3): 247-258.
- Symes M, Waddington G, Adams R. (2010). "Depth of ankle inversion and discrimination of foot positions." Percept Mot Skills **111**:475– 84.
- Rapp, M.A., Krampe, R.T., Baltes, P.B. (2006). "Adaptive task prioritization in aging: selective resource allocation to postural control is preserved in Alzheimer disease." Am. J. Geriatr. Psychiatry **14**, 52–61.
- Tagliabue, M., et al. (2009). "Effects of Parkinson's disease on proprioceptive control of posture and reaching while standing." Neuroscience **158**(4): 1206-1214.
- Taylor, M. E., et al. (2013). "Physical impairments in cognitively impaired older people: implications for risk of falls." Int Psychogeriatr **25**(1): 148-156.
- Thaler, D. S. (2002). "Design for an aging brain." Neurobiol Aging **23**(1): 13-15.
- Teasdale, N. and M. Simoneau (2001). "Attentional demands for postural control: the effects of aging and sensory reintegration." Gait Posture **14**(3): 203-210.
- Tsang, W. W. and C. W. Hui-Chan (2004). "Effects of exercise on joint sense and balance in elderly men: Tai Chi versus golf." Med Sci Sports Exerc **36**(4): 658-667.
- Tsang, W. W., & Hui-Chan, C. W. (2010). "Static and dynamic balance control in older golfers." Journal of aging and physical activity **18**(1), 1–13.
- van Wegen, E. E., et al. (2002). "Postural orientation: age-related changes in variability and time-to-boundary." Hum Mov Sci **21**(1): 61-84.

- Vermette et al. (2022). "Interaction Between the Proprioceptive and attentional demands of dynamic postural control in sedentary seniors." Submitted, GeroScience.
- Vuillerme, N. and V. Nougier (2004). "Attentional demand for regulating postural sway: the effect of expertise in gymnastics." Brain Res Bull **63**(2): 161-165.
- Willems T, Witvrouw E, Verstuyft J, Vaes P, De Clercq D. (2002). "Proprioception and muscle strength in subjects with a history of ankle sprains and chronic instability." J Athl Train **37**:487–93.
- Winter, D. A., et al. (1998). "Stiffness control of balance in quiet standing." J Neurophysiol **80**(3): 1211-1221.
- Woollacott, M. and A. Shumway-Cook (2002). "Attention and the control of posture and gait: a review of an emerging area of research." Gait Posture **16**(1): 1-14.
- Wright, M. L., et al. (2011). "Age-related declines in the detection of passive wrist movement." Neurosci Lett **500**(2): 108-112.
- Yasuda, K., et al. (2014). "Allocation of Attentional Resources toward a Secondary Cognitive Task Leads to Compromised Ankle Proprioceptive Performance in Healthy Young Adults." Rehabil Res Pract **2014**: 170304.
- Yogev-Seligmann, G., et al. (2008). "The role of executive function and attention in gait." Mov Disord **23**(3): 329-342.
- Zazulak, B. T., et al. (2007). "Deficits in neuromuscular control of the trunk predict knee injury risk: a prospective biomechanical-epidemiologic study." Am J Sports Med **35**(7): 1123-1130.
- Zemková, E. and L. Zapletalová (2022). "The Role of Neuromuscular Control of Postural and Core Stability in Functional Movement and Athlete Performance." Front Physiol **13**: 796097.