

Effet du mouvement oculaire sur le contrôle postural chez les jeunes adultes en santé

David Lafleur, BScHK

Thèse présentée à l'Université d'Ottawa
en vue de satisfaire partiellement aux exigences de la
Maîtrise en sciences de l'activité physique

École des sciences de l'activité physique
Faculté des sciences de la santé
Université d'Ottawa

© David Lafleur, Ottawa, Canada, 2023

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, j'aimerais remercier mon superviseur Dr. Yves Lajoie. Au cours des deux dernières années, tu m'as offert ton temps, ton énergie et ton support dans tous les différents projets que j'entreprends, académique ou non, et j'en suis très reconnaissant. Merci pour tous les beaux moments Yves.

J'aimerais aussi prendre le temps de remercier mon comité : Dr. Nicole Paquet et Dr. Martin Bilodeau. Merci pour tous vos conseils essentiels à la réalisation de ma thèse.

J'aimerais aussi dire merci à mes coéquipiers de laboratoire. Merci pour l'environnement chaleureux et accueillant dans lequel apprendre, mais aussi commettre des erreurs est plaisant et agréable. Merci Nadia Polskaia et Gabrielle St-Amant pour tous les rires. Ma maîtrise en temps de COVID n'aurait pas été la même sans vous !

Merci à ma copine qui a été à mes côtés tout au long de mon parcours académique. Cette thèse ne serait pas écrite sans ton support inconditionnel et ton écoute. Je t'aime. Finalement, j'aimerais remercier ma grande famille (frères, sœurs, parents, beaux-parents) pour votre amour et vos encouragements. Vous m'inspirez tous à être la meilleure version de moi-même.

Être à la maîtrise pendant la COVID ne fût pas chose facile. Merci du fond du cœur à tous ceux qui ont été présent pour moi. Sur ce, bonne lecture !

Abrégé

Des données récentes suggèrent que l'exécution d'une tâche induisant des saccades améliore la stabilité par rapport à la fixation statique. Cependant, elles supposent la linéarité du contrôle postural en interprétant uniquement la zone de déplacement et/ou la vitesse de balancement. A l'inverse, des mesures non linéaires pourraient apporter une meilleure compréhension du contrôle postural. L'objectif est d'examiner l'effet des mouvements oculaires sur différentes mesures linéaires et non linéaires de la stabilité.

On a demandé à 21 adultes en bonne santé ($24,0 \pm 3,3$ ans) de se tenir debout sur une plateforme de force, pieds joints, et de regarder le moniteur situé devant eux. Cinq conditions ont été testées : yeux fermés, regard aléatoire, point statique fixe, saccade et poursuite visuelle. Cinq essais de 60 secondes par condition ont été réalisés. Une ANOVA à mesures répétées a été réalisée pour chaque variable de contrôle postural dans chaque direction : antéro-postérieure (AP) et médio-latérale (ML).

L'absence de vision a eu un impact négatif sur le contrôle de la posture, comme en témoigne une augmentation de l'aire et de la variabilité du balancement ainsi qu'une réduction des contributions de la bande « ultra-low ». La saccade a conduit à une plus grande stabilité que le regard aléatoire, comme en témoigne une zone plus petite. Cependant, la poursuite visuelle a entraîné une diminution de la stabilité par rapport au regard aléatoire, comme le montre une zone d'oscillation plus grande, ainsi qu'une augmentation de la variabilité. Il convient de noter que l'énergie contenue dans la bande « very-low », qui indique la contribution du système vestibulaire, était plus élevée dans la poursuite visuelle que dans le point statique fixe.

MOUVEMENT DES YEUX, ATTENTION ET CONTRÔLE DE LA POSTURE

Table des matières

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION.....	1
1. Introduction.....	1
CHAPITRE 2 : REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	3
1. Caractériser le contrôle postural	3
2. Attention et focus pendant le mouvement visuel.....	4
3. Contrôle oculaire et extraoculaire pendant le mouvement visuel.....	6
4. Revue de Bonnet et Baudry (2016) et ses nombreuses limites.....	8
5. Utilisation de mesures dynamiques non-linéaires.....	10
5.1. Transformation par ondelettes	10
5.2. « Sample entropy ».....	12
Objectif et Hypothèses	14
CHAPITRE 3: MANUSCRIPT	15
CHAPITRE 4 : DISCUSSION GÉNÉRALE	37
1. Effet de l'occlusion des yeux.....	38
2. Effet de la saccade oculaire.....	39
3. Effet de la poursuite visuelle.....	40
4. Effet de la fixation d'une cible.....	42
5. Sample entropy	43
6. Différences entre études.....	44

MOUVEMENT DES YEUX, ATTENTION ET CONTRÔLE DE LA POSTURE

CHAPITRE 5 : CONCLUSION	45
1. Sommaire des résultats	45
2. Limitations	45

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

1. Introduction

Le contrôle postural est une fonction essentielle au mouvement du corps pouvant mener à des conséquences désastreuses si mal régulé. Celui-ci est principalement modulé par la sensation du mouvement d'un individu en relation à son environnement. En d'autres mots, l'information sensorielle provenant de multiples origines, à la suite d'un changement des récepteurs spécifiques au système somatosensoriel, vestibulaire et/ou visuel, est intégrée par le système nerveux central (SNC) afin de contrôler l'équilibre corporel ; le SNC produit divers ajustements posturaux en réponse à l'information afférente dans l'optique de maintenir le centre de masse du corps (CdM) dans une position stable (Samuel, 2015).

De fait, lors des activités quotidiennes, l'environnement est exploré visuellement de façon continue. À l'aide des yeux, l'être humain est en mesure d'acquérir une panoplie de caractéristiques et particularités concernant ses alentours en plus de pouvoir accomplir des tâches visuelles telles que chercher, identifier, suivre et analyser ce qui l'entoure et le tout avec plus ou moins d'attention et de conscience. Comme suggéré plus haut, cette information est compilée et utilisée pour réguler la stabilité du corps. Cependant, la vision n'est pas indispensable au contrôle de l'équilibre puisqu'il est possible de se tenir debout dans le noir sans problème. Maintes études expliquent l'implication et l'importance de la vision pour l'équilibre en comparant la stabilité du corps en fonction de l'occlusion des yeux et ce dans diverses conditions d'instabilité et de déformations sensorielles (Paulus et al., 1987; Day et al., 1993). Cependant, il est supposé qu'il y a plus à l'explication que seulement l'augmentation du flux en information visuelle causée par l'ouverture des yeux.

MOUVEMENT DES YEUX, ATTENTION ET CONTRÔLE DE LA POSTURE

Plus précisément, il est important d'explorer l'influence des comportements oculomoteurs nécessaires à l'exploration de l'environnement sur le contrôle postural telles que la fixation, la saccade oculaire ou la poursuite visuelle. En effet, une panoplie de chercheurs observent une diminution des oscillations posturales lorsqu'un participant doit effectuer une tâche nécessitant une saccade ou une poursuite (Stoffregen et al., 2006 ; Rougier et Garin, 2007 ; Giveans et al., 2011 ; Rodrigues et al., 2013; Bonnet et Baudry, 2016). Les mouvements oculaires effectués consciemment durant une tâche visuelle précise auraient donc une influence positive sur la stabilité et l'équilibre. Cependant, les mécanismes neurologiques et physiologiques sous-jacents ce phénomène demeurent sous controverse. Il y a lieu de se demander si ce phénomène pourrait être expliqué par l'hypothèse de l'automatisme et des structures sous-corticales engagées par une double-tâche conjointement à l'apport en information des modes de détection oculaire et extraoculaire activés lors du mouvement des yeux.

En bref, nous questionnons le rôle et la fonction des informations visuelles récoltées sous différents comportements oculaires comme fixation, saccades et poursuite visuelle, en ce qui a trait au contrôle de la posture et de l'équilibre.

CHAPITRE 2 : REVUE DE LA LITTÉRATURE

2. Caractériser le contrôle postural

L'équilibre est une habileté motrice essentielle au bon déroulement et développement d'une vie saine ; nous permettant d'effectuer un éventail d'activités et de tâches en station debout allant de la raquette en forêt au brossage des dents. Pour ce faire, le corps humain est muni d'un système complexe de contrôle postural. De fait, plusieurs structures du SNC organisent l'information provenant des sens et envoient des commandes motrices en conséquence dans le but de maintenir l'équilibre et l'orientation du corps (Massion, 1994). Le contrôle postural intègre donc harmonieusement l'influx du SNC, du système musculosquelettique et du système sensoriel afin de fournir une représentation interne détaillée de la position et de l'orientation des différents segments corporels en fonction de l'environnement (Massion, 1994).

Si vous vous levez et placez vos pieds à la largeur de vos hanches ; vous réaliserez que vous bougez légèrement de droite à gauche, d'avant à l'arrière. Ces oscillations posturales sont tout à fait normales et même indispensables au contrôle de la posture. Toutefois, leur origine est depuis longtemps controversée. Certains chercheurs croient que ces oscillations sont la conséquence d'erreurs ou de délais dans les ajustements posturaux : afin de garder le CdM du corps stable, le centre de pression (CdP - sommation des forces de réaction au sol) serait bougé dans différentes directions grâce aux contractions des muscles du bas du corps (Winter et al., 1996). Par contre, de plus récentes études supportent plutôt un modèle selon lequel les oscillations posturales existent dans le but d'explorer l'environnement afin d'acquérir de l'information sensorielle (Michaud, Lafleur et Lajoie, 2022). Néanmoins, il est convenu, de façon générale, qu'une augmentation de ces

MOUVEMENT DES YEUX, ATTENTION ET CONTRÔLE DE LA POSTURE

oscillations chez un individu en santé indique un contrôle postural moins stable alors qu'une diminution des oscillations indique un contrôle postural plus stable (Paillard et Noé, 2015).

Tout comme le contrôle postural, la vision est importante à nos vies de tous les jours. C'est un sens puissant qui permet, de façon consciente ou inconsciente, de se familiariser avec l'environnement : les surfaces, les objets, les dimensions, la profondeur, la hauteur, etc. Les yeux peuvent localiser, suivre et reconnaître ; des actions nécessaires à l'exécution d'une panoplie d'activités et de tâches quotidiennes. Évidemment, le système visuel doit interagir avec le système du contrôle de l'équilibre dû à son apport d'informations importantes quant aux alentours permettant de détecter le mouvement corporel relatif aux structures qui composent le champ visuel (Dichgans et Brandt, 1978). De plus en plus d'études proposent même que le mouvement des yeux interagisse positivement avec le contrôle de l'équilibre (Bonnet et Baudry, 2016).

3. Attention et focus pendant le mouvement visuel

L'attention est définie comme étant la capacité de traiter l'information ; chaque tâche demandant un niveau différent d'attention (Woollacott et Shumway-Cook, 2002). S'il est considéré que se tenir debout est une tâche primaire non automatique, l'ajout d'une tâche secondaire nécessitant le mouvement des yeux devrait occasionner une augmentation de la demande attentionnelle ; c'est le paradigme de la double-tâche (Woollacott et Shumway-Cook, 2002). Cette situation de double tâche demande un certain niveau d'attention afin d'effectuer les deux tâches motrices (position debout et mouvement des yeux) simultanément et de façon efficace (McIsaac et al. 2015).

MOUVEMENT DES YEUX, ATTENTION ET CONTRÔLE DE LA POSTURE

Selon le modèle de ressources attentionnelles limitées (Kahneman, 1973), l'augmentation de la demande en attention causée par la tâche secondaire altère la performance de la tâche primaire s'il y a présence d'un trop grand niveau d'interférence (Woollacott et Shumway-Cook, 2002). Cette théorie suggère donc que le mouvement des yeux pourrait avoir un effet négatif sur la stabilité et l'équilibre et donc une augmentation des oscillations posturales.

Différemment à cette idée, l'hypothèse de l'action contrainte de Wulf (2013 pour une revue) propose que le fait de volontairement penser à sa posture lorsque demandé de bouger le moins possible) cause une augmentation de l'interférence avec des processus automatiques qui s'occupent de l'équilibre. Un focus attentionnel externe est donc préférable afin d'améliorer l'équilibre. De fait, l'augmentation de la demande attentionnelle causée par une tâche secondaire, cognitive dans le cas de Polskaia et Lajoie (2016), semblable à un focus externe à la tâche, permet une déviation d'un contrôle volontaire de la posture à un contrôle plus automatique et efficace par le SNC.

De plus, cette automaticité du contrôle postural, initiée et observée à l'aide du théorème de la double tâche, semble être régulée par certaines structures sous-corticales (Richer et Lajoie, 2020). Ceci permettrait une réorganisation des structures cérébrales de niveau supérieur de façon à améliorer la performance de la double tâche et mènerait à une réduction des oscillations posturales (Polskaia et Lajoie, 2016; Richer, Polskaia et al., 2017). Cette théorie suggère donc que le mouvement des yeux devrait avoir un effet positif sur la stabilité et l'équilibre et donc une diminution des oscillations posturales.

Effectivement, plusieurs ont découvert que l'exécution d'un mouvement des yeux, lorsque debout, améliore la stabilité et l'équilibre chez les adultes en santé (Bonnet et

MOUVEMENT DES YEUX, ATTENTION ET CONTRÔLE DE LA POSTURE

Baudry, 2016 pour revue). Ces résultats semblent démontrer que limiter l'habilité de consciemment se concentrer sur la posture en maximisant l'attention sur une seconde tâche, le mouvement visuel dans ce cas-ci, promeut l'automaticité du contrôle postural et améliore ainsi l'équilibre et la stabilité.

4. Contrôle oculaire et extraoculaire pendant le mouvement visuel

Lors de l'étude du mouvement visuel, l'emphase est habituellement mise sur trois comportements oculomoteurs : le contrôle du regard (maintien de la fixation), la saccade oculaire et la poursuite visuelle (Kowler, 2011). Ces trois types de mouvement nous permettent d'accomplir la grande majorité des tâches visuelles nécessaires à nos activités quotidiennes. Comme vu précédemment, il semble que l'équilibre est amélioré lorsqu'un individu effectue une tâche visuelle. La revue de Guerraz et Bronstein (2008) prend une voie assez différente de notre hypothèse d'automaticité afin d'expliquer le phénomène et discute plutôt de deux modes de détection pouvant agir de concert dans la régulation de la posture : le contrôle oculaire et le contrôle extraoculaire.

Pour commencer, il est proposé qu'une source importante de l'information visuelle provient du mouvement de l'image sur la rétine dû aux oscillations posturales, à la transposition des objets dans l'environnement et aux mouvements de l'œil ; c'est ce qu'on appelle le flux optique ou le glissement rétinien et compose le contrôle oculaire de l'équilibre (Gibson, Olum et Rosenblatt, 1955). Toutefois, il est important d'explorer le mouvement visuel dans un contexte où le flux optique est minimisé. Lorsque comparées à l'obscurité totale, les oscillations posturales d'un individu sont largement diminuées quand celui-ci fixe, sans bouger la tête, un point illuminé se déplaçant dans un milieu autrement plongé dans l'obscurité (Paulus, Straube et Brandt, 1984). Dans cette condition particulière,

MOUVEMENT DES YEUX, ATTENTION ET CONTRÔLE DE LA POSTURE

un autre mécanisme que le glissement rétinien permet l'amélioration de l'équilibre puisque l'image, étant placée sur la fovéa tout au long de l'expérimentation, ne bouge pas sur la rétine ; c'est ce que les chercheurs ont décrits comme perception du mouvement extrarétinal ou contrôle extraoculaire. Selon certains, l'information utilisée proviendrait directement des récepteurs proprioceptifs (p.ex. fuseaux neuromusculaires) de l'œil alors que d'autres suggèrent plutôt la présence d'une copie d'efférence, contenant les conséquences sensorielles du mouvement anticipées, utilisée par le SNC pour contrôler la posture (Weir, 2000).

Ces deux modes d'apport en information visuelle sont des processus qui ne nécessitent pas d'avantage d'attention à l'exécution du mouvement. Ils s'engagent afin d'améliorer la posture lorsqu'une tâche visuelle, attentionnelle ou non, est réalisée. Par exemple, le fait d'effectuer des saccades oculaires précises diminue les oscillations posturales (Stoffregen et al., 2006). Toutefois, Bonnet, Szaffarczyk et Baudry (2017) détermine qu'un individu est plus stable lorsqu'il est demandé de chercher un élément dans une image que lorsqu'il ne fait que regarder la même image sans but précis. Il existe donc une certaine interaction, une certaine intégration entre les structures de l'attention, du mouvement visuel et du contrôle de la posture. Le contrôle oculaire et extraoculaire pourraient travailler de concert avec les structures s'occupant du contrôle postural engagées davantage dû à la tâche visuelle précise. Le tout sans interférence puisque l'aspect cognitif et attentionnel du mouvement visuel dû à la tâche précise permettrait de détourner le focus et restructurer les voies empruntées par l'information afin de permettre un contrôle postural plus automatique, plus efficace tout comme le fait une tâche cognitive secondaire (Richer et Lajoie, 2020).

5. Revue de Bonnet et Baudry (2016) et ses nombreuses limites

Bonnet et Baudry (2016) ont sélectionné neuf études pour une revue sur le sujet démontrant que les jeunes adultes en santé oscillent significativement moins lors d'une tâche visuelle nécessitant une saccade ou une poursuite visuelle que lorsqu'ils fixent un point. Les participants oscillent moins lorsqu'ils sont à la recherche d'une cible que lorsqu'ils fixent un point ou regardent une image quelconque (Bonnet, Szaffarczyk et Baudry, 2017) ; lorsqu'ils cherchent une lettre dans un texte que lorsqu'ils regardent un panneau blanc (Bonnet et al., 2010 ; Prado, Duarte et Stoffregen, 2007) ; lorsqu'ils effectuent des saccades oculaires horizontales que lorsqu'ils fixent un point statique (Stoffregen et al., 2006 ; Stoffregen et al., 2007 ; Rougier et Garin, 2007 ; Giveans et al., 2011 ; Rodrigues et al., 2013).

Leur revue semble être dans le but de réfuter les hypothèses de l'action contrainte, des structures sous-corticales et du niveau d'attention concernant l'utilisation du paradigme de la double tâche avec tâche visuelle et de mettre de l'avant leur modèle de synergie vision – posture ; celui-ci n'étant pas basé sur les limites cognitives du SNC. Selon eux, l'augmentation de la demande cognitive par une tâche visuelle précise permettrait une meilleure synergie entre le contrôle de la posture et les mouvements oculaires (faible synergie lors de la fixation et forte synergie lors d'une tâche active) ce qui expliquerait l'amélioration de l'équilibre. Ils affirment qu'une réduction de l'oscillation lors d'un mouvement guidé des yeux mènent à une augmentation de la stabilité visuelle afin d'effectuer des saccades plus précises. Toutefois, leur argument pour écarter l'hypothèse d'automatisme se base sur la supposition que la tâche posturale la moins complexe (p.ex. se tenir debout et fixer un point) devrait engager le plus de processus automatiques

MOUVEMENT DES YEUX, ATTENTION ET CONTRÔLE DE LA POSTURE

puisqu'elle semble être la plus facile. Puisque l'être humain passe ses journées à accomplir des tâches et des activités en station debout nécessitant divers niveaux d'attention, le SNC devrait plutôt s'assurer que la tâche performée le plus souvent et le plus couramment soit automatique et limite l'interférence (Schneider et Chein, 2003). Pour cette raison, la double tâche engagerait les structures sous-corticales s'occupant de l'automatisme (Clark, 2015), qui malgré leur activation seraient en mesure de recevoir et interpréter l'information provenant du contrôle oculaire et extraoculaire lors du mouvement des yeux, afin d'améliorer le contrôle postural en dépit d'une demande attentionnelle accrue. Tel que décrit dans la prochaine section, une méthode et analyse plus rigoureusement conçues pourraient potentiellement délivrer des résultats supportant davantage l'hypothèse d'automatisme du contrôle postural en double tâche.

De fait, l'une des plus grandes limitations des études utilisées afin de valider leur hypothèse est l'explication du phénomène en utilisant uniquement des variables linéaires telles que la variabilité et la vitesse du déplacement du CdP ou du CdM assumant ainsi la linéarité du contrôle postural. Effectivement, le contrôle postural est un système non-linéaire régulé par l'intégration de l'information sensorielle afférente, des circuits spinaux et supraspinaux, des fonctions cognitives et du système neuromusculaire périphérique (Zhou et al. 2017). La relation entre cet apport en information et l'efférence musculaire est continuellement modulée menant à des stratégies de contrôle postural changeantes à multiples échelles de temps et d'espace. Leur analyse et compréhension du phénomène et surtout de son automatisme lors de la double tâche demeurent incomplètes sans la présence de mesures non-linéaires afin de caractériser la complexité de l'oscillation.

Il est important de mentionner que quelques études démontrent une augmentation des oscillations posturales lors de poursuites visuelles (Glasauer et al., 2005; Laurens et al., 2010) en présence ou non d'un champ visuel en mouvement. Ceci pourrait être lié au fait que cette tâche nécessite une interprétation plus élaborée du flux optique en contexte de contrôle postural, ainsi que des signaux extraoculaires plus complexes (Laurens et al., 2010).

6. Utilisation de mesures dynamiques non-linéaires

Afin d'explorer davantage le phénomène, certaines mesures dynamiques non-linéaires semblent capter notre attention soit : transformation par ondelettes et « sample entropy ». Leur utilisation fournit plus d'informations sur le comportement du système postural compte tenu de la complexité intrinsèque des oscillations en plus de proposer des pistes d'explications en termes d'automaticité (Richer et Lajoie, 2020).

5.1. Transformation par ondelettes

L'utilisation d'une transformation par ondelettes, une analyse non-linéaire du contrôle postural décomposant le signal du centre de pression en différentes bandes de fréquence, permet de capturer une analyse détaillée des variations d'une série temporelle (Stergiou et Decker, 2011). Malgré sa possible utilisation variée, il est suggéré que la contribution de chacun des systèmes sensoriels à la modulation de la posture est reflétée par une bande d'une certaine fréquence (Lacour, Bernard-Demande et Dumitrescu, 2008). Par exemple, il est déterminé que l'énergie dans la bande « ultralow » (comprise sous les fréquences de 0,1 Hz) diminue chez les individus se tenant debout avec les yeux fermés contrairement aux yeux ouverts (Chadges et al., 2009) ; de fait, confirmant l'étendue des

MOUVEMENT DES YEUX, ATTENTION ET CONTRÔLE DE LA POSTURE

fréquences affectées par la vision. Toutefois, c'est principalement l'analyse wavelet de l'effet de l'occlusion des yeux, et non de leur activité, sur le contrôle postural qui a fait l'objet d'études.

Lacour et al. (2018) sont les premiers à approcher le phénomène à l'aide d'une analyse de type « wavelet ». Leur méthode consiste à appliquer la transformation par ondelettes sur le signal afin d'en extraire la densité de puissance spectrale (DPS), qu'ils expriment sous forme d'échelle de logarithme décimal, contenue dans l'entièreté du signal ainsi que dans les fréquences de contribution de la vision. Ils prétendent aussi être en mesure de calculer un index d'instabilité postural à partir de la même analyse. Cependant, ils semblent déceler chez leurs jeunes adultes en santé une réduction du DPS dans les fréquences associées au système visuel lorsque les participants doivent effectuer des mouvements visuels (Lacour et al. 2018). Ce résultat va à l'encontre de ce qui a été suggéré par Chagdes et al. (2009) en ce qui a trait à l'activité du système visuel. Cependant, il supporte l'hypothèse+ de l'automatisme étant supposé être représentée par une diminution de la contribution de la bande « ultralow » (sous les fréquences de 0,1 Hz) (Richer et Lajoie, 2020). Lacour et al. (2018), en effectuant les mouvements des yeux dans le noir complet (autre que la lumière à suivre), minimise l'effet du contrôle oculaire de l'équilibre (en maintenant le point relativement stable sur la fovéa et en rendant la vision périphérique inutilisable) et ainsi réduit considérablement l'apport en information de la vision provenant normalement du glissement rétinien. De fait, l'information visuelle recueillie est presque entièrement expliquée par le contrôle extraoculaire. Toutefois, ne comparant pas leurs résultats à un environnement bien éclairé, ils ne sont qu'en mesure d'expliquer une portion du phénomène. De plus, ils n'utilisent aucunes mesures permettant de suggérer un contrôle

plus automatique et efficace. À cause de cela, peu d'informations concrètes en ce qui concerne le rôle des mouvements visuels sur la posture sont retenues de cette étude.

Bien que le concept de bandes de fréquence représentant la contribution de différents systèmes semble intéressant et attrayant, il doit être interprété avec une certaine précaution. L'étendue des fréquences incluses à l'intérieur des bandes ne semblent malheureusement pas faire l'unanimité entre chercheurs menant à un manque de standard clair en ce qui regarde à la division du signal du CdP affectant ainsi ce que les résultats peuvent représenter (Quek et al., 2018). Tel que mentionné par Michaud, Lafleur et Lajoie (2022), les fréquences choisies pour composer les différentes bandes peuvent ne pas être assez précise pour détecter un « reweighting » sensoriel durant un contrôle plus automatique de la posture en double tâche. D'où l'importance d'explorer et d'étudier cette méthode d'analyse davantage. Comme montré dans cette section, seulement une poignée d'études ont investigué la transformation par ondelettes en relation avec le contrôle postural, sans mentionner qu'une seule et unique étude s'intéresse spécifiquement au mouvement oculaire.

5.2. « Sample entropy »

« Sample entropy », une seconde mesure non-linéaire d'intérêt, est utilisée pour caractériser la régularité et la complexité du signal du CdP (Lake et al., 2002; Richman & Moorman, 2000). Il est proposé qu'une diminution des valeurs d'entropie reflète un système contrôlé et contraint ; suite à un accident vasculaire cérébral par exemple (Roerdink et al, 2006). Cette régularité augmentée pourrait indiquer une plus grande implication cognitive dans le contrôle de la posture (Stins et al., 2009). Contrairement, une augmentation des valeurs d'entropie reflète un système plus aléatoire et moins prédictible

MOUVEMENT DES YEUX, ATTENTION ET CONTRÔLE DE LA POSTURE

(Donker et al., 2007). Cette irrégularité augmentée pourrait indiquer un système plus automatique (Potvin-Desrochers et al., 2017).

Jusqu'à présent, seulement deux études s'intéressent à la variation en complexité du contrôle postural afin d'expliquer la diminution de l'oscillation du corps durant le mouvement des yeux (Yeomans et al., 2018; Bizovska et al., 2019).

L'étude de Yeomans et al. (2018) supporte les précédents résultats en démontrant qu'une saccade visuelle diminue l'oscillation posturale lorsque comparée au maintien de la fixation sur un point statique pour la majorité des variables linéaires utilisées. De plus, les valeurs de « sample entropy » sont plus élevées lors de la saccade indiquant un contrôle postural plus automatique et efficace tel que mentionné plus haut. Toutefois, l'objectif de ce groupe n'était pas tout à fait d'observer l'effet du mouvement des yeux sur la posture, mais plutôt l'effet de l'état de fatigue musculaire sur le contrôle postural. Leur méthode manque donc un peu de profondeur (p.e. manque de contrôle et de diversité de mouvements visuels) pour affirmer l'hypothèse d'automaticité.

En ce qui a trait à l'étude de Bizovska et al. (2019), ils ne trouvent aucune influence d'un mouvement visuel sur « sample entropy ». Toutefois, une multitude de limitations empêche la généralisation et l'utilisation de leurs données. Il y a tout d'abord la participation de personnes âgées en moyenne de 70 ans, que nous savons pouvant mener à des résultats contradictoires lorsque le contrôle postural est étudié, sans la présence de jeunes adultes en santé pouvant agir comme contrôle. De plus, il y a l'utilisation d'un coussinet de mousse créant une tâche d'équilibre plus difficile ainsi qu'une procédure séparant le corps en segment et interprétant leur mouvement à l'aide de multiples

accéléromètres. Leur méthode sortant de l'ordinaire semble complexifier et affecter leur possible interprétation d'un phénomène qui est à ce jour déjà peu étudié.

Objectif et Hypothèses

L'objectif de cette thèse est d'examiner et d'explorer l'impact des comportements oculomoteurs, plus spécifiquement la fixation, la saccade oculaire et la poursuite visuelle lors d'une tâche visuelle précise sur certaines mesures linéaires et non-linéaires du contrôle de la posture.

L'hypothèse de l'automatisme et des structures sous-corticales dû à une double tâche nous semble être la plus plausible afin d'expliquer l'amélioration de la stabilité et de l'équilibre lors de comportements oculomoteurs précis. Nous devrions observer une amélioration du contrôle postural par l'entremise d'une diminution de la variabilité de déplacement du centre de pression (CdP), une plus grande contribution du système visuel apparente par l'énergie contenue dans la bande de fréquence « ultralow » suite à la transformation par ondelettes et une augmentation du « sample entropy » dans les conditions incitant un mouvement des yeux dans l'atteinte d'un but précis.

CHAPITRE 3: MANUSCRIPT

The impact of eye movement on postural control depends on the type of oculomotor behavior and the visual task

David Lafleur^a, Yves Lajoie^{a*}

^aSchool of Human Kinetics, University of Ottawa, ON, Canada

*Yves Lajoie, PhD. (corresponding author)

University of Ottawa, Health Sciences, School of Human Kinetics

125 University St, Ottawa, Ont., Canada, K1N 6N5

Telephone: +1-613-562-5800 ext. 4273

Email: ylajoie@uottawa.ca

The impact of eye movement on postural control depends on the type of oculomotor behavior and the visual task

Abstract

Recent evidence suggests that performing a task inducing saccades will improve stability when compared to static fixation. However, they assume the linearity of postural control by only interpreting the area of displacement and/or the velocity of sway. Conversely, non-linear measures could bring a better understanding of postural control. The aim is to examine the effect of eye movements on different linear and non-linear measures of stability.

21 healthy adults (24.0 ± 3.3 years) were asked to stand on a force platform with their feet together and look at the monitor in front of them. Five conditions were tested: eyes closed, random looking, fixed static point, saccade, and visual pursuit. Five 60-second trials per condition were performed. An ANOVA with repeated measures was completed for each postural control variables in each direction: antero-posterior (AP) and medio-lateral (ML).

The absence of vision had a negative impact on sway, as seen by an increase in sway area and variability as well as reduced contributions from the ultra-low band. The saccade led to greater stability than the random looking, as evidenced by a smaller area. However, the visual pursuit led to decreased stability compared to random looking, as evidenced by a larger area, as well as increased variability. Of note, the energy contained in the very-low band, which indicates the contribution of the vestibular system, was highest in the visual pursuit compared to the fixed static point.

The findings support that the visual system is an important, but complex contributor to stability as different eye movements result in distinct postural responses with saccade and visual pursuit causing a decrease and an increase in sway, respectively.

Keywords: postural control – visual pursuit – saccades – automaticity

Acknowledgements: This work was supported by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) and the *Fonds de recherche du Québec - nature et technologies* (FRQNT).

Word count: 2974

Introduction

Postural control is an essential function to movement as it can lead to negative consequences if it is poorly regulated. The sensorial information, collected following a mechanical change of receptors specific to the somatosensorial, vestibular and/or visual system, is integrated by the central nervous system (CNS) to control balance. The CNS produces various postural adjustments in response to maintaining the body's center of mass (COM) in a stable position [1]. The visual system must interact with the balance control system due to its contribution of important information about the surroundings allowing the detection of body movement relative to the structures that compose the visual field [2]. Therefore, it is important to explore the influence of oculomotor behaviors on posture.

Recent evidence suggests that performing a visual task that induces precise eye movements, either through ocular saccade or visual pursuit, will improve stability in healthy young adults when compared to control visual tasks (i.e. static fixation or random looking) [3]. The authors believe that when a guided visual movement is performed,

postural sway is reduced to ensure effective eye control [3]. The postural control system intentionally reduces sway to facilitate the performance of the visual task [4]. On the other hand, multiple studies note an augmented sway during visual pursuit [5-7] likely caused by an increase in retinal flow [8].

However, these studies assume the linearity of postural control by only analyzing linear measure of sway (i.e., variability and velocity of COM's displacement). Postural control is a nonlinear system regulated by the integration of afferent sensory information, spinal and supraspinal circuits, cognitive functions, and the peripheral neuromuscular system [9]. The relationship between input of information and muscle efference is continuously modulated, leading to changing postural control strategies at multiple time and space scales. The understanding of these findings will remain incomplete without the presence of non-linear measures to characterize the complexity of the center of pressure (COP) oscillations. The use of the wavelet transform, a nonlinear analysis of postural control that decomposes the center-of-pressure signal into different frequency bands, allows to capture a detailed analysis of the variations along a time series [10]. It is suggested that the contribution of each sensory system to the modulation of posture is reflected by a certain frequency band (i.e. a rise in the ultra-low band signifies more involvement of the visual system) [11]. Studies interested in eye movement and postural control using this analysis only focuses on the effect of eyes occlusion [12] and the effect of eye movement in a dark room [13]. Sample entropy (SampEn) is a non-linear measure used to characterize the regularity and complexity of the COP signal [12-13]. It is proposed that increased entropy values reflect a more random and less predictable system [14]. This heightened irregularity is suggested to reflect a more automatic system [15]. To date, only

a handful of studies address the variation in complexity of postural control to explain the impact on body sway during eye movement [16-17]. [17] supports the previous results by showing that a visual saccade decreases postural sway when compared to maintaining fixation on a static point. In addition, they found that sample entropy values are higher during the saccade indicating a more automatic and efficient postural control [17].

Indeed, removing attention from a rather automatic motor task, such as postural control, is suggested to minimize the effort of constant balance monitoring resulting in performance optimization [18]. Thus, eye movements involved in a precise visual task might improve stability by shifting the participant's focus away from the postural task. In this way, opportunities to interfere with motor control processes are limited, promoting a more automatic mode of postural control [19] leading to a reorganisation of the higher-level cerebral structures to improve performance [20-21].

As such, the aim of this study is to examine the impact of oculomotor behaviours during various visual task on linear and non-linear measures of postural control. We hypothesize 1) an improvement in stability through a decrease in the area and the variability of the COP displacement, 2) an increase in the contribution of the visual system apparent by the energy contained in the "ultralow" frequency band following the wavelet analysis, and 3) an increase in the "sample entropy" in all conditions inducing oculomotor behavior in the achievement of a specific precise goal.

Method

Participants

The study involved the participation of 21 healthy young adults (18-30 years old) free of motor deficiencies, injuries or diseases affecting the locomotor and/or neurological system, as well as good (or corrected) visual acuity in order to systematically evaluate the effect of eye movement on postural control. These participants were therefore classified as being “healthy”. The study was approved by the Research Board at the University of Ottawa. Participants signed an informed consent form prior to testing.

Apparatus

This study used an AMTI ORG-6-1000 force platform (Watertown, MA) with a sampling rate of 100 Hz to capture the position of the COP (i.e., the sum of the anterior-posterior (AP) and medial-lateral (ML) ground reaction forces), a monitor (24 inches) adjustable in height to display the different visual tasks, and a camera to track and record the participant's eye movement, as well as confirm adherence to the task. All of this was done in a room containing as few distracting elements as possible. In the context of this experiment, it was important that the various visual tasks be performed without movement of the head. It was therefore suggested that the movement of the point on the screen cause a displacement of the eye of less than 15° [22].

Visual tasks

To explore the interaction between different oculomotor behavior, and postural control, the experiment included five conditions. In the eyes closed (EC) condition, the participant closed their eyes for the entire trial. In the random looking (RL) condition, the

MOUVEMENT DES YEUX, ATTENTION ET CONTRÔLE DE LA POSTURE

participant's eyes could wander randomly within the white screen, without a specific goal. In the static fixed point (FP) condition, the participant stared at the static red point (radius = 1.5 cm for all conditions) in the center of the white screen. In the visual pursuit (VP) condition, the participant stared at the moving red dot on the white screen. It follows a horizontal motion of 30 cm from one side to the other with the cycle (right to left, then left to right) repeating 5 times. Given the displacement and time constraint, the speed of the moving dot was approximately 5 cm/s. In the ocular saccade (OS) condition the participant followed the red dot appearing and disappearing from right to left on the white screen at a frequency of 0.75 Hz. The two points of appearance are separated by 30 cm and their position, when unlit, is indicated by a gray dot (eye movement of 15° with 1.15 m between the center of the force platform and the screen)

Procedure

Firstly, the participant was asked to stand on the force platform with their feet together and their arms along their body. Once in position, the investigator placed marks on the platform to mark the location of their feet. This way, they were able to come back to the same position after a rest period. Then, the height of the monitor was adjusted so that its center was at the participant's eye level. Finally, the investigator explained the course of the experiment to the participant allowing them to familiarize themselves with the different conditions; an example of each visual task was shown.

The experiment had five blocks of trials [23]. Each block included the five conditions performed randomly one after the other followed by a one-minute rest given to the participant to look away from the screen and to loosen their legs. Each condition

proceeded as follows: the first five seconds notified and prepared the participant for the condition; the next 60 seconds collected data from the force platform.

Data analysis

MATLAB software (Math Works Inc., MA, USA) was used to attain the linear and non-linear measures of postural control from the COP signal. The linear measures included an area of 95% confidence ellipse and standard deviation (SD) of COP in the anterior-posterior (AP) and medial-lateral (ML) direction. The non-linear measures were SampEn and the wavelet transform in AP and ML. Prior to the analysis, with the exception of the wavelet transform, the COP signal was passed through a second order low-pass Butterworth filter with a cut-off frequency of 5 Hz [24].

The wavelet transform analysis is based on the procedure of Quek et al. [25]. The COP signal was split using a 12-level Symlet-8 wavelet with a one-dimensional multi-signal analysis. The 12 levels were subsequently combined to create frequency bands: 'moderate' (1.56 to 6.25 Hz, represents muscular proprioceptive components), 'low' (0.39 to 1.56 Hz, represents cerebellar contributions), 'very-low' (0.10 to 0.39 Hz, represents vestibular system) and 'ultra-low' (below 0.10 Hz, represents visual system) [26].

SampEn is a measure of signal regularity giving a value between 0 and 1. The larger the value, the more irregular the COP signal is [26] hence a more automatic the postural control. The Richman and Moorman formula was used for the calculation [27]:

$$\text{SampEn}(m, r, N) = -\log\left(\frac{A(r)}{B(r)}\right)$$

Where m is the number of points to be compared in a sequence of length N , and where $A(r)$ and $B(r)$ are the total number of matching sequences at a tolerance level r in the appropriate dimensional space. A value of $m = 2$ and $r = 0.2 \times \text{standard deviation}$ were used [26].

Statistical analysis

For each of the variables and conditions, a mean per participant was calculated and used for analysis. A repeated measures analysis of variance (ANOVA) on the different visual tasks was performed on the linear (95% confidence ellipse area, standard deviation of COP in AP and ML and, velocity of COP in AP and ML) as well as the non-linear (wavelet transform and SampEn) variables. Statistical significance was set at $p \leq 0.05$. For all measurements, a post-hoc analysis with Bonferroni correction was performed, when necessary, to know the location of the effect. If Mauchly's sphericity test was violated, a Greenhouse-Geisser correction was provided.

Results

Means and standard deviations for the linear and non-linear measures as well as significance are presented in **Figures 1 and 2**.

Area of 95% confidence ellipse

The main effect of condition, $F(1.567, 31.34) = 25.785, p < 0.001, \eta^2_p = 0.563$, on sway area was statistically significant. Post-hoc analysis indicated that EC generated significantly larger sway areas when compared to the other conditions ($p < 0.01$). Also, VP yielded significantly larger sway areas than FP, RL, and OS ($p < 0.01$). OS generated significantly smaller sway areas than RL ($p = 0.05$).

SD of COP

The main effect of condition in AP, $F(4, 80) = 19.824, p < 0.001, \eta^2_p = 0.498$, and in ML, $F(2.177, 43.54) = 39.644, p < 0.001, \eta^2_p = 0.665$, on SD of COP were statistically significant. Post-hoc analysis indicated that EC SD of COP was significantly larger than every other condition in AP ($p \leq 0.001$) and FP, RL, and OS ($p \leq 0.001$) in ML. Also, VP SD of COP was significantly larger than OS in AP ($p = 0.003$) and FP, RL, and OS in ML ($p \leq 0.001$).

SampEn

The main effect of condition in AP, $F(4, 80) = 9.964, p < 0.001, \eta^2_p = 0.333$, and in ML, $F(4, 80) = 9.588, p < 0.001, \eta^2_p = 0.324$, on SampEn were statistically significant. Post-hoc analysis indicated that EC SampEn was significantly higher than FP, RL, and OS

in AP ($p \leq 0.05$) and every other condition in ML ($p \leq 0.05$). VP generated significantly higher SampEn than FP in AP ($p = 0.04$).

Wavelet

The main effect of condition in AP, $F(4, 80) = 5.122$, $p < 0.001$, $\eta^2_p = 0.204$, and in ML, $F(4, 80) = 7.728$, $p < 0.001$, $\eta^2_p = 0.279$, on the very-low band of the wavelet transform was statistically significant. Post-hoc analysis indicated that VP energy contained in the very-low band was significantly higher than FP and EC in ML ($p \leq 0.027$). RL generated more energy than FP in this band for both directions ($p \leq 0.045$).

The main effect of condition in AP, $F(4, 80) = 6.916$, $p < 0.001$, $\eta^2_p = 0.257$, and in ML, $F(4, 80) = 13.202$, $p < 0.001$, $\eta^2_p = 0.398$, on the ultra-low band of the wavelet transform was statistically significant. Post-hoc analysis indicated that EC energy contained in the ultra-low band was significantly lower than FP, RL, and OS in ML ($p \leq 0.02$) and FP in AP ($p < 0.001$). FP generated more energy than VP and RL in ML and AP ($p \leq 0.014$).

Discussion

The objective of the present experiment was to examine the impact of eye movement during precise visual tasks on linear and non-linear measures of postural control. We predicted that the conditions inducing an oculomotor behaviour to achieve a precise goal would lead to an improvement in stability through a decrease in the area and the variability of COP displacement, an increase in the contribution of the visual system evidenced by an increase in the ultralow frequency band, and an increase in the irregularity of COP. The present findings were not fully in line with the predictions made. Increasing precise eye movements did not yield consistent improvements in stability.

The absence of vision had a negative impact on sway measurements, as seen by an increase in sway area, and the variability of COP displacement. This was also observed by reduced contributions from the ultra-low band, suggesting decreased involvement of the visual system. Additionally, the present data also demonstrates an increase in the irregularity of COP when eyes were closed. This conflicts with the suggestion that increased irregularity is a sign of automaticity and better control of posture [14]. We expected eyes close to constrain the motor system yielding a more regular COP trajectory. That being said, high SampEn, or increase in irregularity, in this case could be a sign of loss in structure due to conflicting and/or compromised sensory input [28].

Previous research has shown that VP promotes better control of posture through the reduction of body sway [29]. However, the present data indicated that VP causes an increase in sway area and variability when compared to other tasks without visual deprivation. During visual pursuit, the target stays stable on the fovea [30], but the peripheral information contained within the visual field changes rapidly throughout the

ocular movement. This augmented retinal flow could lead to a more challenging integration of the visual information regarding spatial orientation [18]. Also, it is possible that VP produced slight head movements inducing the increase of sway seen in our findings [6]. In fact, the very-low band indicated increased contribution during the VP task, suggesting greater involvement of the vestibular system in the control of posture. However, the maximum angle of eye movement chosen should not induce head rotation, which limits this argument. A recently proposed synergistic model [3] could explain the increase of sway in VP by an attempt to synch with the visual pursuit to stabilize the retinal flow and accurately complete the visual task. However, this has not been proven.

Previous research suggests that OS promotes a better control of posture through the reduction of body sway [3]. Our results revealed OS to reduce postural sway when compared to RL. [31] found that the influence of vision on posture was suppressed during the periods when saccadic eye movements were happening, suggesting that there is very little negative influence of the optical flow during the change in image from one point to the other. In combination with this, since RL and OS both required the performance of quick eye movements, the increase in stability during OS could likely be explained by the increased precision and complexity specifically needed during that task. The shift of focus away from movement, caused by the active continuous nature of the OS task, may have minimized disruption to the automatic processes used to regulate the control of posture, [18] therefore enabling greater integration of the information as evidenced by the decrease in sway area and velocity [20-21]. However, the heightened SampEn, suggesting automaticity, previously found [17] could not be replicated. Therefore, the proposed

synergistic model [3] could also explain the decrease of sway in OS by an attempt to ensure effective eye control.

As for the FP condition, the increased contribution of the visual system on postural control during this task is supported by an increase in the ultralow band. [32] indicated that this oculomotor behavior is composed of complex mechanisms that stabilize the eyes (i.e., small saccades, microsaccades, and head movement to prevent retinal motion from becoming too fast). However, while non-linear measures of sway showed an effect for FP, linear measures did not appear to be affected by FP when compared to RL and OS. This could mean that a heightened contribution of the visual system does not necessarily lead to a better postural performance.

Indeed, a potential cause for the observed differences between this experiment and previous findings could lie in foot placement. This current study places participants with their feet together, a strategy defined as more difficult (similarly to standing on a "foam" or in semi-tandem [5-7]). All of these studies observed an increase in postural sway during visual pursuit. However, [29,33-35] used normal, standardized, or wide foot width and all found a reduction in sway during active visual tasks. Thus, it appears that the difficulty of the foot position could dictate the effect of precise visual tasks, other than saccades, on postural control.

Conclusion

In conclusion, the present experiment observed changes to postural control during the performance of various visual tasks. The findings support the understanding that the visual system is an important, but complex contributor to stability as different eye movements result in distinct postural responses with the saccade and the visual pursuit causing a decrease and an increase in sway, respectively. Moreover, our data highlights the value of using both linear and non-linear posturographic measures when analyzing COP.

Conflict of interest

The researchers have no conflict of interest to declare.

References

- [1] Samuel, A. J. (2015). A Critical Review on the Normal Postural Control. *Physiotherapy and Occupational Therapy Journal*, 8(2), 71–75.
- [2] Dichgans, J., & Brandt, T. (1978). Visual-vestibular interaction: Effects on self-motion perception and postural control. In *Perception* (pp. 755-804). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [3] Bonnet, C. T., & Baudry, S. (2016). Active vision task and postural control in healthy, young adults: Synergy and probably not duality. *Gait & posture*, 48, 57-63.
- [4] Stoffregen, T. A., Bardy, B. G., Bonnet, C. T., & Pagulayan, R. J. (2006). Postural stabilization of visually guided eye movements. *Ecological Psychology*, 18(3), 191-222.
- [5] Glasauer, S., Schneider, E., Jahn, K., Strupp, M., & Brandt, T. (2005). How the eyes move the body. *Neurology*, 65(8), 1291-1293.
- [6] Laurens, J., Awai, L., Bockisch, C. J., Hegemann, S., Van Hedel, H. J. A., Dietz, V., & Straumann, D. (2010). Visual contribution to postural stability: Interaction between target fixation or tracking and static or dynamic large-field stimulus. *Gait & posture*, 31(1), 37-41.
- [7] Thomas, N. M., Bampouras, T. M., Donovan, T., & Dewhurst, S. (2016). Eye movements affect postural control in young and older females. *Frontiers in aging neuroscience*, 8, 216.
- [8] Schulmann, D. L., Godfrey, B., & Fisher, A. G. (1987). Effect of eye movements on dynamic equilibrium. *Physical therapy*, 67(7), 1054-1057.

- [9] Zhou, J., Habtemariam, D., Iloputaife, I., Lipsitz, L. A., & Manor, B. (2017). The complexity of standing postural sway associates with future falls in community-dwelling older adults: the MOBILIZE Boston study. *Scientific reports*, 7(1), 1-8.
- [10] Stergiou, N., & Decker, L. M. (2011). Human movement variability, nonlinear dynamics, and pathology: is there a connection?. *Human movement science*, 30(5), 869-888.
- [11] Lacour, M., Bernard-Demanze, L., & Dumitrescu, M. (2008). Posture control, aging, and attention resources: Models and posture-analysis methods. *Neurophysiologie Clinique*, 38(6), 411–421.
- [13] Chagdes, J. R., Rietdyk, S., Haddad, J. M., Zelaznik, H. N., Raman, A., Rhea, C. K., & Silver, T. A. (2009). Multiple timescales in postural dynamics associated with vision and a secondary task are revealed by wavelet analysis. *Experimental Brain Research*, 197(3), 297–310.
- [13] Lacour, M., Dosso, N. Y., Heuschen, S., Thiry, A., Van Nechel, C., & Toupet, M. (2018). How eye movements stabilize posture in patients with bilateral vestibular hypofunction. *Frontiers in neurology*, 9, 744.
- [14] Donker, S. F., Roerdink, M., Greven, A. J., & Beek, P. J. (2007). Regularity of center-of-pressure trajectories depends on the amount of attention invested in postural control. *Experimental Brain Research*, 181(1), 1–11.
- [15] Potvin-Desrochers, A., Richer, N., & Lajoie, Y. (2017). Cognitive tasks promote automatization of postural control in young and older adults. *Gait & Posture*, 57, 40–45.

MOUVEMENT DES YEUX, ATTENTION ET CONTRÔLE DE LA POSTURE

- [16] Bizovska, L., Vagaja, M., Mihalova, D., & Janura, M. (2019). Saccadic eye movements and their influence on kinematics of several body segments in the elderly while standing. *Acta of bioengineering and biomechanics*, 21(2).
- [17] Yeomans, M. A., Nelson, A. G., MacLellan, M. J., & Hondzinski, J. M. (2018). Visually-guided saccades attenuate postural sway under non-fatigued, fatigued, and stretched states. *Experimental brain research*, 236(12), 3351-3361.
- [18] Wulf, G. (2013). Attentional focus and motor learning: A review of 15 years. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 6(1), 77–104.
- [19] Huxhold, O., Li, S. C., Schmiedek, F., & Lindenberger, U. (2006). Dual-tasking postural control: aging and the effects of cognitive demand in conjunction with focus of attention. *Brain research bulletin*, 69(3), 294-305.
- [20] Polskaia, N., & Lajoie, Y. (2016). Reducing postural sway by concurrently performing challenging cognitive tasks. *Human movement science*, 46, 177-183.
- [21] Polskaia, N., & Lajoie, Y. (2017). Continuous Cognitive Task Promotes Greater Postural Stability than an Internal or External Focus of Attention in Older Adults. *Experimental Aging Research*, 43(1), 21–33.
- [22] Hallett, P. E. (1986). Eye movements, *Handbook of Human Perception and Performance*.
- [23] Michaud, L., Richer, N., & Lajoie, Y. (2021). Number of Trials Needed to Assess Postural Control of Young Adults in Single and Dual-Task. *Journal of motor behavior*, 53(1), 30-39.

- [24] Michaud, L., Lafleur, D., & Lajoie, Y. (2021). Effect of Center of Mass Immobilization on Center of Pressure Displacement in Single and Dual-Task. *Journal of Motor Behavior*, 1-11.
- [25] Quek, J., Brauer, S. G., Clark, R., & Treleaven, J. (2014). New insights into neck-pain-related postural control using measures of signal frequency and complexity in older adults. *Gait & posture*, 39(4), 1069-1073.
- [26] Richer, N., & Lajoie, Y. (2020). Automaticity of Postural Control while Dual-tasking Revealed in Young and Older Adults. *Experimental Aging Research*, 46(1), 1–21.
- [27] Richman, J. S., & Moorman, J. R. (2000). Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 278(6), H2039–H2049.
- [28] Borg, F. G., & Laxåback, G. (2010). Entropy of balance-some recent results. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 7(1), 1-11
- [29] Rodrigues, S. T., Polastri, P. F., Carvalho, J. C., Barela, J. A., Moraes, R., & Barbieri, F. A. (2015). Saccadic and smooth pursuit eye movements attenuate postural sway similarly. *Neuroscience letters*, 584, 292-295.
- [30] Thier, P., & Ilg, U. J. (2005). The neural basis of smooth-pursuit eye movements. *Current opinion in neurobiology*, 15(6), 645-652.
- [31] White, K. D., Post, R. B., & Leibowitz, H. W. (1980). Saccadic eye movements and body sway. *Science*, 208(4444), 621-623.

[32] Kowler, E. (2011). Eye movements: The past 25 years. *Vision research*, 51(13), 1457-1483.

[33] Bonnet, C. T., Kinsella-Shaw, J. M., Frank, T. D., Bubela, D. J., Harrison, S. J., & Turvey, M. T. (2009). Deterministic and stochastic postural processes: Effects of task, environment, and age. *Journal of Motor Behavior*, 42(1), 85-97.

[34] Bonnet, C. T., Szaffarczyk, S., & Baudry, S. (2017). Functional synergy between postural and visual behaviors when performing a difficult precise visual task in upright stance. *Cognitive science*, 41(6), 1675-1693.

[35] Prado, J. M., Stoffregen, T. A., & Duarte, M. (2007). Postural sway during dual tasks in young and elderly adults. *Gerontology*, 53(5), 274-281.

[36] Raffalt, P. C., Spedden, M. E., & Geertsen, S. S. (2019). Dynamics of postural control during bilateral stance—Effect of support area, visual input and age. *Human movement science*, 67, 102462.

[37] Thomas, N. M., Bampouras, T. M., Donovan, T., & Dewhurst, S. (2016). Eye movements affect postural control in young and older females. *Frontiers in aging neuroscience*, 8, 216.

MOUVEMENT DES YEUX, ATTENTION ET CONTRÔLE DE LA POSTURE

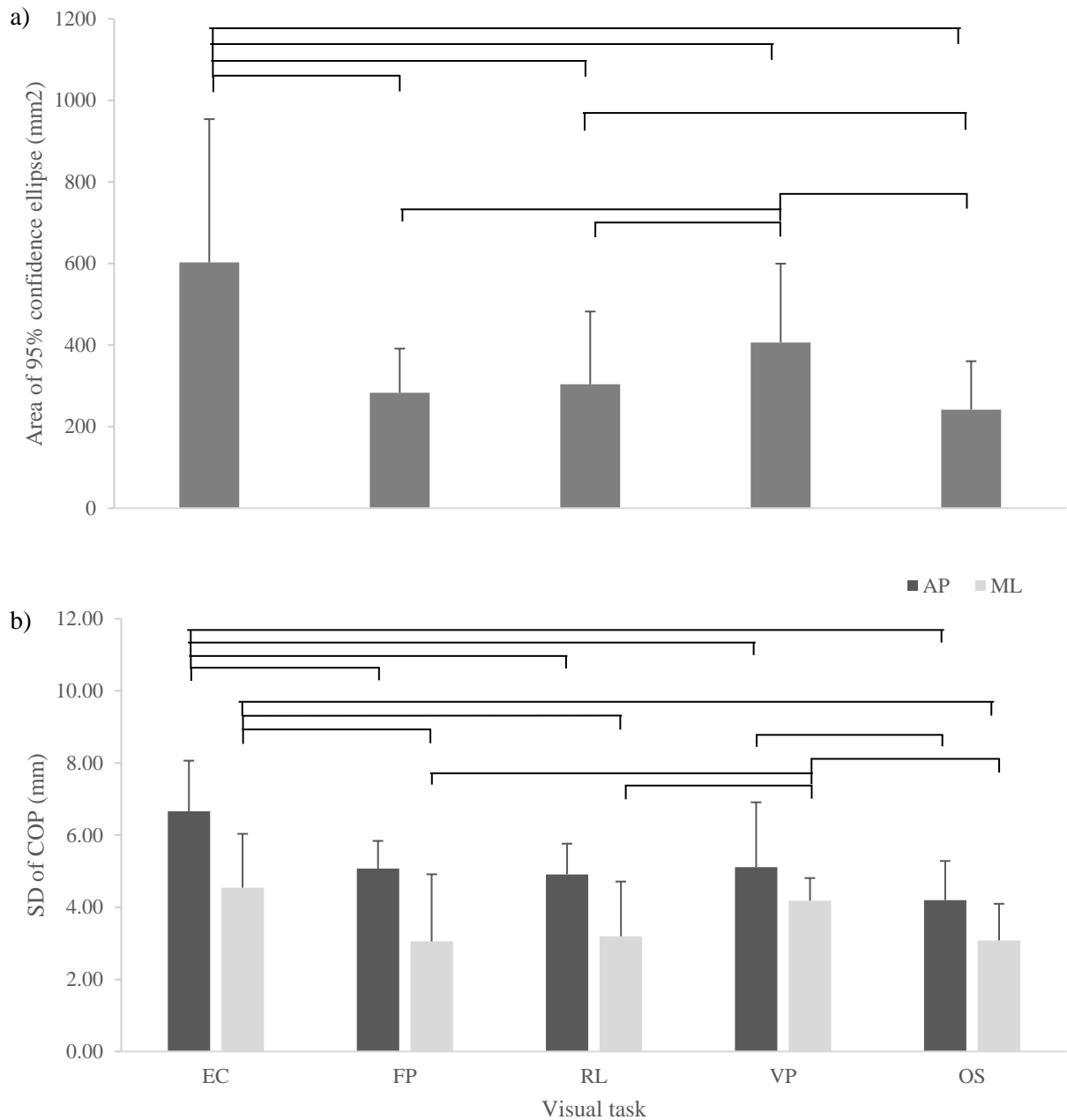


Figure 1. Means and standard deviations of the linear measures a) Area of 95% confidence ellipse (mm²) and b) SD of COP (mm) in both directions (AP and ML) for the five visual tasks with significance bars ($p < .05$).

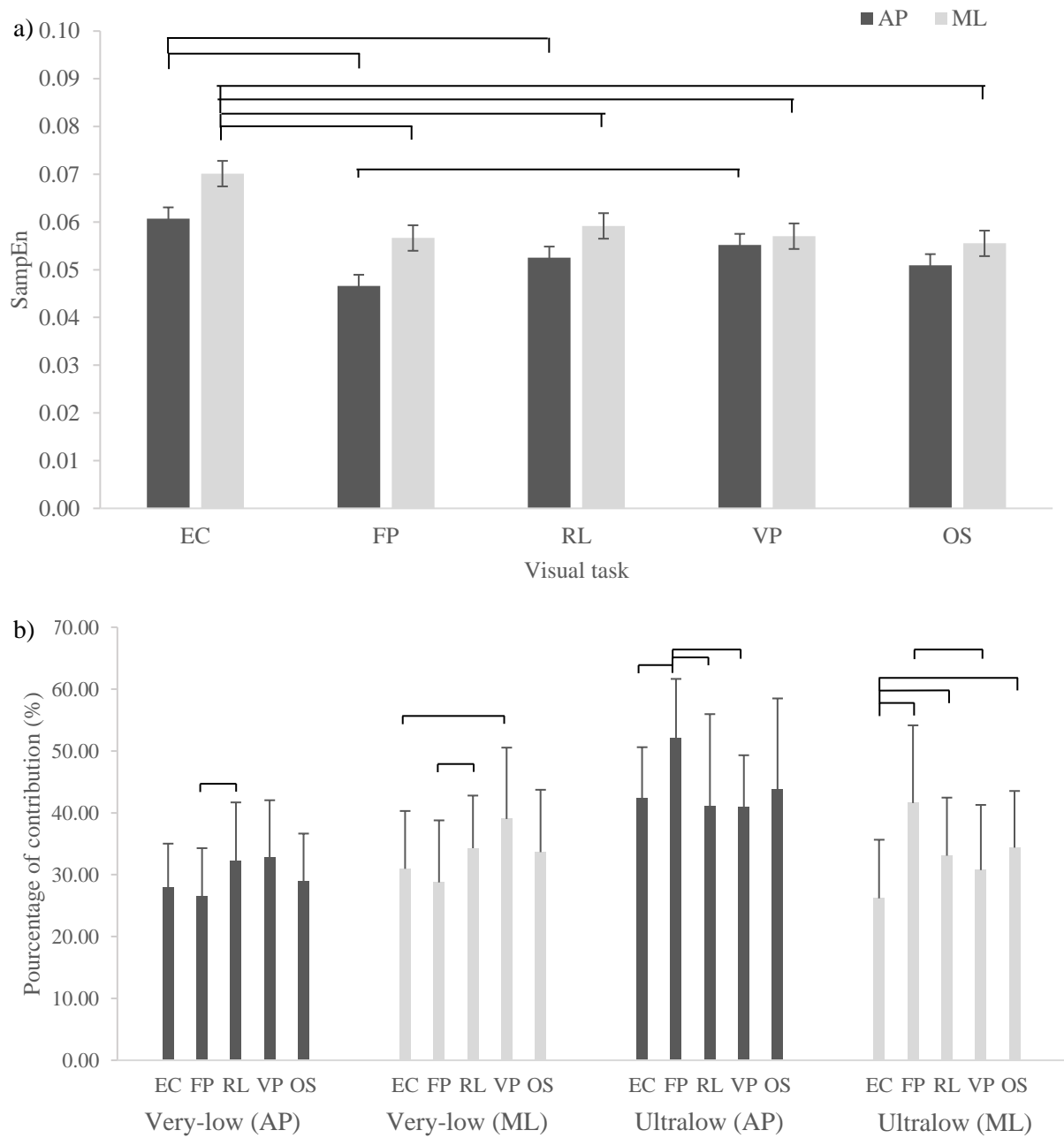


Figure 2. Means and standard deviations of the non-linear measures a) SampEn and b) Very-low and ultralow bands of the wavelet analysis in both directions (AP and ML) for the five visual tasks with significance bars ($p < .05$).

CHAPITRE 4 : DISCUSSION GÉNÉRALE

L'objectif de cette expérimentation est d'examiner et d'explorer l'impact des comportements oculomoteurs, plus spécifiquement la fixation, la saccade oculaire et la poursuite visuelle lors de tâches visuelles précises, ou non, sur certaines mesures linéaires (aire, variabilité et vitesse du déplacement du CdP) et non-linéaires (SampEn et analyse de transformation par ondelettes) du contrôle de la posture. L'hypothèse suggérée propose que les mesures linéaires doivent indiquer un meilleur équilibre durant les tâches visuelles précises et actives comme VP et OS démontré par une diminution de la variabilité, de l'aire et de la vitesse des oscillations. Conjointement, les valeurs de SampEn doivent augmentées en plus d'être accompagnées d'un changement spécifique des différentes bandes suite à l'analyse de la transformation par ondelettes surtout en ce qui concerne la bande ultra-low. Ainsi, les résultats devraient fournir des preuves supplémentaires à la présence d'automatisme dans le contrôle de la posture lors de l'exécution de diverses tâches oculomotrices de façon similaire à lors de l'exécution de tâches cognitives (Richer et Lajoie, 2020).

Les résultats de cette étude ne supportent pas entièrement l'hypothèse qui est initialement proposée. De fait, l'effet sur la posture semble différer grandement d'une tâche visuelle à l'autre en fonction des propriétés et des mécanismes intrinsèques aux mouvements des yeux ainsi que de l'attention et de la précision portées à la tâche avec par exemple la saccade et la poursuite causant respectivement une diminution et une augmentation de l'oscillation posturale.

1. Effet de l'occlusion des yeux

Tout d'abord, l'importance de la fonction visuelle au contrôle de la posture est surtout observée durant la condition EC. L'absence d'afférence visuelle occasionne une augmentation marquée de chacune des mesures linéaires (aire, SD et vitesse du déplacement du COP) lorsque comparées à quasi chacune des tâches visuelles ce qui suggère une diminution générale de la stabilité. Une diminution de la contribution dans la bande ultra-low est en ligne avec la littérature en ce qui a trait au contrôle visuel de la posture : la vision stabilisant l'oscillation à des fréquences sous 0.1 Hz (Horak, 1996). Il est important de noter que l'énergie contenue dans cette bande n'a pas complètement disparue suggérant la présence d'autres mécanismes de stabilisation que la vision dans ces fréquences.

Aussi, la diminution de la contribution dans la bande ultra-low semble être couplée à l'augmentation de la contribution des bandes very low, low and moderate lors de la condition EC ce qui reflète l'idée que le système nerveux tente de mettre l'emphase sur le système vestibulaire, le cervelet et les récepteurs proprioceptifs lorsque la vision n'est pas disponible. Ce phénomène est généralement identifié comme étant un « sensory reweighting » (Peterka, 2002). De plus, il est suggéré qu'un contrôle à boucle ouverte observé dans les fréquences > 1 Hz, induit une stratégie de rigidité pour compenser l'absence de vision (Chagdes et al., 2009) ce qui pourrait contribuer à l'augmentation des oscillations posturales observées. Même s'il a précédemment été suggéré qu'un déplacement de l'énergie vers ces bandes (diminution de la bande ultra-low accompagné d'une augmentation des bandes very-low, low et moderate) indiquerait un contrôle plus

automatique (Richer et Lajoie, 2020), il semblerait que la présence de la fonction visuelle soit essentielle à un équilibre optimal.

Les présentes données démontrent également une augmentation de l'irrégularité du COP lorsque les yeux sont fermés à travers une élévation de SampEn. Cela va à l'encontre de la suggestion selon laquelle une irrégularité accrue est un signe d'automatisme et de meilleur contrôle de la posture (Donker et al., 2007). Il était attendu que l'occlusion des yeux contraignent le système moteur à produire une trajectoire de CdP plus régulière (p.e. diminution du SampEn). Ceci étant dit, un SampEn élevé, comme c'est le cas pour les données obtenues dans cette présente étude, pourrait être un signe de perturbations due à des entrées sensorielles conflictuelles et/ou compromises à cause de l'occlusion des yeux (Borg et Laxåback, 2010).

2. Effet de la saccade oculaire

La comparaison entre RL et OS semble être en ligne avec l'hypothèse proposée : OS génère une diminution des oscillations posturales (p.e. aire et vitesse du déplacement du CdP) lorsque comparé à RL.

RL est une tâche visuelle qui incite l'utilisation de saccades et de moment de fixation sans objectif de précision. OS est une tâche visuelle qui incite aussi l'utilisation de saccades et de moment de fixation, mais avec l'objectif de suivre une cible précise. Donc à pareilles contributions extraoculaires, il est compris que OS est une tâche qui demande plus d'attention que RL puisqu'elle nécessite plus de précision active. Selon certains chercheurs, retirer l'attention d'une tâche motrice plutôt automatique, comme le contrôle postural, minimise l'effort de surveillance constante en matière d'équilibre résultant en une

optimisation de la performance (Wulf et al., 2016). Ainsi, en continuant avec la même chaîne d'idées, OS pourrait avoir amélioré la stabilité (p.e. réduction de l'aire d'oscillation lorsque comparé à RL) en éloignant l'attention du participant de la tâche posturale. De cette façon, les opportunités d'interférence avec les processus du contrôle moteur sont limitées ce qui promouvoit un mode de contrôle postural d'autant plus automatique (Huxhold et al., 2006).

Toutefois, les mesures non-linéaires utilisées pour argumenter cette théorie d'automatisme ne semblent pas démontrer de différences significatives entre RL et OS. Les résultats obtenus lors de la comparaison de RL et OS peuvent être expliqués par quelques autres théories. Par exemple, White et al. (1980) ont constaté que l'influence de la vision sur la posture était supprimée pendant les périodes où des mouvements oculaires saccadés se produisaient, ce qui suggère qu'il y a très peu d'influence négative du flux optique pendant le changement d'image d'un point à l'autre. En effet, le regard étant fixé dans la même position pour un court laps de temps permet de mieux estimer la position de la tête en relation avec l'environnement en plus de n'avoir qu'à lier l'image pré-saccade à l'image post-saccade (Schulmann et al., 1987). Ceci conduirait à un meilleur contrôle postural. De plus, l'ajout d'information visuelle importante à la posture afférente et efférente (Guerraz et Bronstein, 2008) pourrait jouer un rôle important. Certains chercheurs croient qu'un mouvement visuel guidé est effectué, en position debout, les oscillations posturales sont réduites afin d'assurer un contrôle efficace des yeux (Stoffregen et al., 2006).

3. Effet de la poursuite visuelle

Différemment du groupe de Rodrigues et al. (2015), la poursuite visuelle d'une cible en mouvement, VP, selon les données recueillies, a occasionné une augmentation de l'aire,

MOUVEMENT DES YEUX, ATTENTION ET CONTRÔLE DE LA POSTURE

de la variabilité et de la vitesse d'oscillations corporelles (surtout en ML) lorsque comparé aux autres conditions visuelles. Ce résultat n'est pas en ligne avec notre hypothèse d'automaticité non plus.

Il peut être assumé que maintenir une image stable sur la rétine est important pour les divers ajustements posturaux nécessaire au maintien de l'équilibre (Schulmann et al., 1987). Durant VP, la cible demeure stable sur la fovéa, cependant l'information périphérique concernant l'environnement se déplace dans le sens opposé du mouvement. Ceci génère un semblant d'environnement en mouvement ce qui rend l'estimation de la position et l'orientation du corps plus complexe expliquant l'augmentation de l'instabilité posturale observée. Ces mêmes résultats sont obtenus par Glasauer et al. (2005), Laurens et al. (2010) et Thomas et al. (2016). Il se pourrait que le principe d'automaticité s'enclenche d'où l'augmentation de SampEn durant VP lorsque comparé à FP. Par contre, l'effet du flux optique demeure trop important pour effectuer un changement positif aux oscillations.

Durant la poursuite visuelle, le corps, en position debout, oscille. Ce mouvement conjoint du corps, qui est aléatoire, et des yeux, qui est prédéterminé, nécessite l'interaction du système vestibulaire afin de maintenir la position précise de la cible sur la fovéa (Fukushima, 2003). Ceci pourrait expliquer l'augmentation marquée de la contribution de la bande very-low durant la poursuite visuelle. Un gain de la contribution du système vestibulaire ne semble pas avoir d'effet bénéfique, mais plutôt négatif sur le contrôle de la posture lorsque les mesures linéaires sont comparées. Laurens et al. (2010) argumente que l'augmentation pourrait être dû à la contraction musculaire des yeux, mais aussi à un léger

MOUVEMENT DES YEUX, ATTENTION ET CONTRÔLE DE LA POSTURE

mouvement de la tête accompagnant la tâche visuelle de poursuite. Cependant, aucune méthode pour mesurer ce présumé mouvement de la tête fût utilisé dans les deux cas.

Stoffregen et al. (2006) pourrait argumenter que l'augmentation de l'oscillation durant VP est en ligne avec leur théorie. De fait, ils concluent que pour remédier à l'augmentation du flux optique causé par la poursuite visuelle, le contrôle postural se lierait à ce mouvement des yeux afin d'améliorer l'efficacité de la tâche visuelle. Ceci expliquerait l'augmentation du déplacement du CdP. Par contre, ceci demeure que spéculation. Il est à se demander pourquoi le cerveau aurait autant de différente manière de fonctionner pour chacune des différentes tâches secondaires : visuelle, auditive, cognitive. L'hypothèse d'automaticité semble être beaucoup plus généralisable.

4. Effet de la fixation d'une cible

Selon l'hypothèse proposée ainsi que la littérature, FP est une tâche simple qui est généralement la condition contrôle. Les différences observées sont généralement en relation à FP. Par contre, il semble que cette tâche est plus complexe qu'à priori.

En effet, la contribution accrue du système visuel sur le contrôle postural pendant cette tâche est soutenue par une augmentation de la bande ultralow. Kowler (2011) indique que ce comportement oculomoteur est composé de multiples mécanismes complexes qui stabilisent les yeux sur la cible (c'est-à-dire de petites saccades, des microsaccades et un mouvement de la tête pour empêcher le mouvement de la rétine d'être trop rapide). Cependant, alors que les mesures non linéaires du contrôle postural ont montré un effet significatif de FP, les mesures linéaires ne semble pas être affectées par la fixation d'un

MOUVEMENT DES YEUX, ATTENTION ET CONTRÔLE DE LA POSTURE

point statique par rapport à RL et OS. Cela pourrait signifier qu'une contribution accrue du système visuel ne conduit pas nécessairement à une meilleure performance posturale.

Aussi, une diminution importante de la contribution de la bande low (cérébelle) est observée durant FP lorsque comparé aux autres tâches visuelles. Ces données supportent l'idée qu'à pareil fonction visuelle (p.e. yeux ouverts) et vestibulaire un déplacement de l'énergie vers les bandes low et moderate, comme c'est le cas pour OS, indiquerait un mode plus automatique avec des mesures linéaires présentant contrôle postural plus stable (Richer et Lajoie, 2020).

Ces résultats encouragent l'opinion que FP, souvent utilisé et considéré comme contrôle, simple et/ou de base, semble être plus complexe et devrait être davantage étudiée surtout en rapport à son effet sur le contrôle de la posture. La tâche de fixation d'un point statique est définitivement modulée par différents mécanismes que RL, son équivalent selon plusieurs méthodes et techniques d'expérimentation utilisée de façon courante dans la littérature.

5. Sample entropy

SampEn est une mesure non-linéaire utilisée en contrôle de la posture pour infirmer l'automatisme (Potvin-Desrochers et al., 2017). Une augmentation des valeurs d'entropie reflète un système plus aléatoire et moins prédictible (Donker et al., 2007). Les données obtenues dans cette présente étude ne permettent pas de suggérer cette augmentation lorsqu'une tâche visuelle demande plus d'attention et de précision (p.e. mouvement des yeux pour l'atteinte d'une cible) comme dans le cas de OS et VP. En AP, une indication d'automatisme peut être observée entre VP et FP. Par contre, les mesures linéaires de VP

ne démontrent pas un contrôle plus efficace de la posture. Une augmentation presque significative ($p = 0.051$) existe en AP entre FP et RL renforçant l'idée que des mécanismes différents régissent les deux tâches visuelles. Maintenir l'utilisation de cette mesure dans de futures expérimentations permettrait de comprendre davantage l'effet du mouvement des yeux sur le contrôle postural.

6. Différences entre études

Comme Thomas et al. (2016) ont noté, les différentes études utilisent chacune différentes méthodes et techniques en ce qui concerne la collecte et l'analyse des données, la tâche posturale et les tâches visuelles pouvant expliquer les différences dans les résultats obtenus.

De fait, une potentielle cause pourrait se trouver dans le placement des pieds. Cette présente étude place les participants les pieds collés, une stratégie définie comme étant plus difficile (de façon similaire à se tenir sur un « foam » ou en semi-tandem (Thomas et al., 2016; Laurens et al., 2010; Glasauer et al., 2005)). Toutes ces études ont observé une augmentation de l'oscillation posturale durant la poursuite visuelle. Étrangement, les études du groupe de Bonnet et al. utilisent une largeur normale des pieds et trouvent tous unanimement une réduction de l'oscillation durant la poursuite visuelle. Il semble donc que la position des pieds dicte l'effet de la poursuite visuelle sur le contrôle postural.

De plus, il y a l'utilisation variée des techniques de capture d'information sur l'oscillation à prendre en ligne de compte : plateforme de force, caméra de capture de mouvement, système inertiel, etc. Optimalement, toutes ces méthodes devraient être équivalentes et livrer les mêmes résultats, mais vue les différents placements posturaux,

MOUVEMENT DES YEUX, ATTENTION ET CONTRÔLE DE LA POSTURE

les diverses tâches visuelles et les multiples mesures possibles, plusieurs inconnues peuvent s'insérer lors de comparaison.

CHAPITRE 5 : CONCLUSION

1. Sommaire des résultats

Pour conclure, cette expérimentation avait comme but d'observer l'effet du mouvement des yeux lors de tâche spécifique sur le contrôle postural à l'aide de mesures linéaire et non-linéaire. Les résultats obtenues supportent l'idée que le système visuel est un important contributeur à l'équilibre. Plus précisément, les divers mouvements des yeux résultent en des réponses posturales distinctes avec la saccade et la poursuite visuelle causant respectivement une diminution et une augmentation des oscillations. Il est suggéré que les changements pendant OS sont dus au déplacement du focus de l'attention alors que les changements pendant VP sont dus à une augmentation du flux optique et du mouvement de la tête. Aussi, les données recueillies démontrent l'importance de ne pas interchanger l'utilisation de FP et RL, les deux semblant avoir leurs propres mécanismes de contrôle de la posture.

2. Limitations

Une première limitation de cette présente étude est l'absence d'une méthode de capture des mouvements de la tête. Une des bases fondamentales de la méthode était

d'empêcher l'ajout de mouvement du corps au courant de la tâche visuelle. De fait, l'argumentaire de l'augmentation de l'oscillation posturale durant la poursuite visuelle suite à des mouvements supplémentaires de la tête demeure de la spéculation sans fondement définitif puisqu'il n'y a aucune manière de le quantifier. Sans contrôler pour la rotation de la tête, il est difficile d'isoler précisément le rôle du mouvement des yeux. De plus, comme mentionné, il y a possiblement l'intrusion de mouvement non postural de la tête qui complique l'interprétation de l'augmentation des oscillations. Finalement, une rotation de la tête peut, en outre, augmenter l'importance du réflexe vestibulo-oculaire qui pourrait rendre complexe l'analyse des mouvements des yeux et du contrôle de la posture.

Une deuxième limitation de cette étude est l'absence d'une méthode de capture des mouvements visuels. Ceci permettrait de confirmer l'adhésion à la tâche de façon beaucoup plus spécifique. Aussi, davantage pourrait être découvert en ce qui concerne la présence de synergie vision-posture. Selon Bonnet et al. (2017), il y aurait un synchronisme vision-posture qui s'effectuerait durant le mouvement des yeux afin d'améliorer la stabilité.

Finalement, comme mentionné par Thomas et al. (2016), peu d'études mentionnent s'être assurées que les participants portent une même attention particulière aux tâches visuelles tout au long des différentes expérimentations. Ceci peut avoir un impact important sur les résultats surtout en ce qui concerne la théorie de l'automatisme qui est si durement rejetée par Bonnet et Baudry (2016).

3. Recherches futures

Suite à cette exploration, il serait très intéressant d'approfondir davantage sur l'effet de la vitesse de la tâche visuelle, surtout en cas de poursuite, et de la difficulté de la tâche posturale et/ou de la largeur de la base de support durant la poursuite visuelle. De cette façon, une élaboration plus précise d'un model expliquant l'effet du mouvement des yeux sur le contrôle de la posture, ainsi que les limites de l'automaticité pourrait être établie.

Références

- Bizovska, L., Vagaja, M., Mihalova, D., & Janura, M. (2019). Saccadic eye movements and their influence on kinematics of several body segments in the elderly while standing. *Acta of bioengineering and biomechanics*, 21(2).
- Bonnet, C. T., & Baudry, S. (2016). Active vision task and postural control in healthy, young adults: Synergy and probably not duality. *Gait & posture*, 48, 57-63.
- Bonnet, C. T., Kinsella-Shaw, J. M., Frank, T. D., Bubela, D. J., Harrison, S. J., & Turvey, M. T. (2009). Deterministic and stochastic postural processes: Effects of task, environment, and age. *Journal of Motor Behavior*, 42(1), 85-97.
- Bonnet, C. T., Szaffarczyk, S., & Baudry, S. (2017). Functional synergy between postural and visual behaviors when performing a difficult precise visual task in upright stance. *Cognitive science*, 41(6), 1675-1693.
- Borg, F. G., & Laxåback, G. (2010). Entropy of balance-some recent results. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 7(1), 1-11.

MOUVEMENT DES YEUX, ATTENTION ET CONTRÔLE DE LA POSTURE

Chagdes, J. R., Rietdyk, S., Haddad, J. M., Zelaznik, H. N., Raman, A., Rhea, C. K., & Silver, T. A. (2009). Multiple timescales in postural dynamics associated with vision and a secondary task are revealed by wavelet analysis. *Experimental Brain Research*, *197*(3), 297–310.

Clark, D. J. (2015). Automaticity of walking: functional significance, mechanisms, measurement and rehabilitation strategies. *Frontiers in human neuroscience*, *9*, 246.

Day, B. L., Steiger, M. J., Thompson, P. D., & Marsden, C. D. (1993). Effect of vision and stance width on human body motion when standing: implications for afferent control of lateral sway. *The Journal of physiology*, *469*(1), 479-499.

Dichgans, J., & Brandt, T. (1978). Visual-vestibular interaction: Effects on self-motion perception and postural control. In *Perception* (pp. 755-804). Springer, Berlin, Heidelberg.

Donker, S. F., Roerdink, M., Greven, A. J., & Beek, P. J. (2007). Regularity of center-of-pressure trajectories depends on the amount of attention invested in postural control. *Experimental Brain Research*, *181*(1), 1–11.

Gibson, J. J., Olum, P., & Rosenblatt, F. (1955). Parallax and perspective during aircraft landings. *The American journal of psychology*, *68*(3), 372-385.

Giveans, M. R., Yoshida, K., Bardy, B., Riley, M., & Stoffregen, T. A. (2011). Postural sway and the amplitude of horizontal eye movements. *Ecological Psychology*, *23*(4), 247-266.

Guerraz, M., & Bronstein, A. M. (2008). Ocular versus extraocular control of posture and equilibrium. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, *38*(6), 391-398.

MOUVEMENT DES YEUX, ATTENTION ET CONTRÔLE DE LA POSTURE

Hallett, P. E. (1986). Eye movements, Handbook of Human Perception and Performance.

Horak, F. B. (1996). Adaptation of automatic postural responses. *The acquisition of motor behavior in vertebrates*, 57-85.

Kahneman, D. (1973). *Attention and effort* (Vol. 1063, pp. 218-226). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

Kowler, E. (2011). Eye movements: The past 25 years. *Vision research*, 51(13), 1457-1483.

Lacour, M., Bernard-Demanze, L., & Dumitrescu, M. (2008). Posture control, aging, and attention resources: Models and posture-analysis methods. *Neurophysiologie Clinique*, 38(6), 411–421.

Lacour, M., Dosso, N. Y., Heuschen, S., Thiry, A., Van Nechel, C., & Toupet, M. (2018). How eye movements stabilize posture in patients with bilateral vestibular hypofunction. *Frontiers in neurology*, 9, 744.

Lake, D. E., Richman, J. S., Griffin, M. P., & Moorman, J. R. (2002). Sample entropy analysis of neonatal heart rate variability. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 283(3), R789–R797.

Laurens, J., Awai, L., Bockisch, C. J., Hegemann, S., Van Hedel, H. J. A., Dietz, V., & Straumann, D. (2010). Visual contribution to postural stability: Interaction between target fixation or tracking and static or dynamic large-field stimulus. *Gait & posture*, 31(1), 37-41.

MOUVEMENT DES YEUX, ATTENTION ET CONTRÔLE DE LA POSTURE

Massion, J. (1994). Postural control system. *Current opinion in neurobiology*, 4(6), 877-887.

McIsaac, T. L., Lamberg, E. M., & Muratori, L. M. (2015). Building a framework for a dual task taxonomy. *BioMed research international*, 2015.

Michaud, L., Lafleur, D., & Lajoie, Y. (2021). Effect of Center of Mass Immobilization on Center of Pressure Displacement in Single and Dual-Task. *Journal of Motor Behavior*, 1-11.

Michaud, L., Richer, N., & Lajoie, Y. (2021). Number of Trials Needed to Assess Postural Control of Young Adults in Single and Dual-Task. *Journal of motor behavior*, 53(1), 30-39.

Paillard, T., & Noé, F. (2015). Techniques and methods for testing the postural function in healthy and pathological subjects. *BioMed research international*, 2015.

Paulus, W. M., Straube, A., & Brandt, T. H. (1984). Visual stabilization of posture: physiological stimulus characteristics and clinical aspects. *Brain*, 107(4), 1143-1163.

Paulus, W., Straube, A., & Brandt, T. H. (1987). Visual postural performance after loss of somatosensory and vestibular function. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 50(11), 1542-1545.

Peterka, R. J. (2002). Sensorimotor integration in human postural control. *Journal of neurophysiology*, 88(3), 1097-1118.

Polskaia, N., & Lajoie, Y. (2016). Reducing postural sway by concurrently performing challenging cognitive tasks. *Human movement science*, 46, 177-183.

MOUVEMENT DES YEUX, ATTENTION ET CONTRÔLE DE LA POSTURE

Potvin-Desrochers, A., Richer, N., & Lajoie, Y. (2017). Cognitive tasks promote automatization of postural control in young and older adults. *Gait & Posture*, *57*, 40–45.

Prado, J. M., Stoffregen, T. A., & Duarte, M. (2007). Postural sway during dual tasks in young and elderly adults. *Gerontology*, *53*(5), 274-281.

Quek, J., Treleaven, J., Clark, R. A., & Brauer, S. G. (2018). An exploratory study examining factors underpinning postural instability in older adults with idiopathic neck pain. *Gait & Posture*, *60*, 93–98.

Richer, N., & Lajoie, Y. (2020). Automaticity of Postural Control while Dual-tasking Revealed in Young and Older Adults. *Experimental Aging Research*, *46*(1), 1–21.

Richer, N., Polskaia, N., & Lajoie, Y. (2017). Continuous Cognitive Task Promotes Greater Postural Stability than an Internal or External Focus of Attention in Older Adults. *Experimental Aging Research*, *43*(1), 21–33.

Richman, J. S., & Moorman, J. R. (2000). Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, *278*(6), H2039–H2049.

Rodrigues, S. T., Aguiar, S. A., Polastri, P. F., Godoi, D., Moraes, R., & Barela, J. A. (2013). Effects of saccadic eye movements on postural control stabilization. *Motriz: Revista de Educação Física*, *19*(3), 614-619.

Rodrigues, S. T., Polastri, P. F., Carvalho, J. C., Barela, J. A., Moraes, R., & Barbieri, F. A. (2015). Saccadic and smooth pursuit eye movements attenuate postural sway similarly. *Neuroscience letters*, *584*, 292-295.

MOUVEMENT DES YEUX, ATTENTION ET CONTRÔLE DE LA POSTURE

Roerdink, M., De Haart, M., Daffertshofer, A., Donker, S. F., Geurts, A. C. H., & Beek, P. J. (2006). Dynamical structure of center-of-pressure trajectories in patients recovering from stroke. *Experimental Brain Research*, *174*(2), 256–269.

Rougier, P., & Garin, M. (2007). Performing saccadic eye movements or blinking improves postural control. *Motor control*, *11*(3), 213-223.

Samuel, A. J. (2015). A Critical Review on the Normal Postural Control. *Physiotherapy and Occupational Therapy Journal*, *8*(2), 71–75.

Schneider, W., & Chein, J. M. (2003). Controlled & automatic processing: behavior, theory, and biological mechanisms. *Cognitive science*, *27*(3), 525-559.

Schulmann, D. L., Godfrey, B., & Fisher, A. G. (1987). Effect of eye movements on dynamic equilibrium. *Physical therapy*, *67*(7), 1054-1057.

St-Amant, G., Rahman, T., Polskaia, N., Fraser, S., & Lajoie, Y. (2020). Unveiling the cerebral and sensory contributions to automatic postural control during dual-task standing. *Human movement science*, *70*, 102587.

Stergiou, N., & Decker, L. M. (2011). Human movement variability, nonlinear dynamics, and pathology: is there a connection?. *Human movement science*, *30*(5), 869-888.

Stins, J. F., Michielsen, M. E., Roerdink, M., & Beek, P. J. (2009). Sway regularity reflects attentional involvement in postural control: Effects of expertise, vision and cognition. *Gait & Posture*, *30*(1), 106–109.

Stoffregen, T. A., Bardy, B. G., Bonnet, C. T., Hove, P., & Oullier, O. (2007). Postural sway and the frequency of horizontal eye movements. *Motor Control*, *11*(1).

MOUVEMENT DES YEUX, ATTENTION ET CONTRÔLE DE LA POSTURE

Stoffregen, T. A., Bardy, B. G., Bonnet, C. T., & Pagulayan, R. J. (2006). Postural stabilization of visually guided eye movements. *Ecological Psychology*, *18*(3), 191-222.

Thomas, N. M., Bampouras, T. M., Donovan, T., & Dewhurst, S. (2016). Eye movements affect postural control in young and older females. *Frontiers in aging neuroscience*, *8*, 216.

Weir, C. R. (2000). Spatial localisation: does extraocular muscle proprioception play a role?. *Graefe's archive for clinical and experimental ophthalmology*, *238*(10), 868-873.

Winter, D. A., Prince, F., Frank, J. S., Powell, C., & Zabjek, K. F. (1996). Unified theory regarding A/P and M/L balance in quiet stance. *Journal of Neurophysiology*, *75*(6), 2334–2343.

Woollacott, M., & Shumway-Cook, A. (2002). Attention and the control of posture and gait: A review of an emerging area of research. *Gait and Posture*, *16*(1), 1–14.

Wulf, G. (2013). Attentional focus and motor learning: A review of 15 years. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, *6*(1), 77–104.

Yeomans, M. A., Nelson, A. G., MacLellan, M. J., & Hondzinski, J. M. (2018). Visually-guided saccades attenuate postural sway under non-fatigued, fatigued, and stretched states. *Experimental brain research*, *236*(12), 3351-3361.

Zhou, J., Habtemariam, D., Iloputaife, I., Lipsitz, L. A., & Manor, B. (2017). The complexity of standing postural sway associates with future falls in community-dwelling older adults: the MOBILIZE Boston study. *Scientific reports*, *7*(1), 1-8.

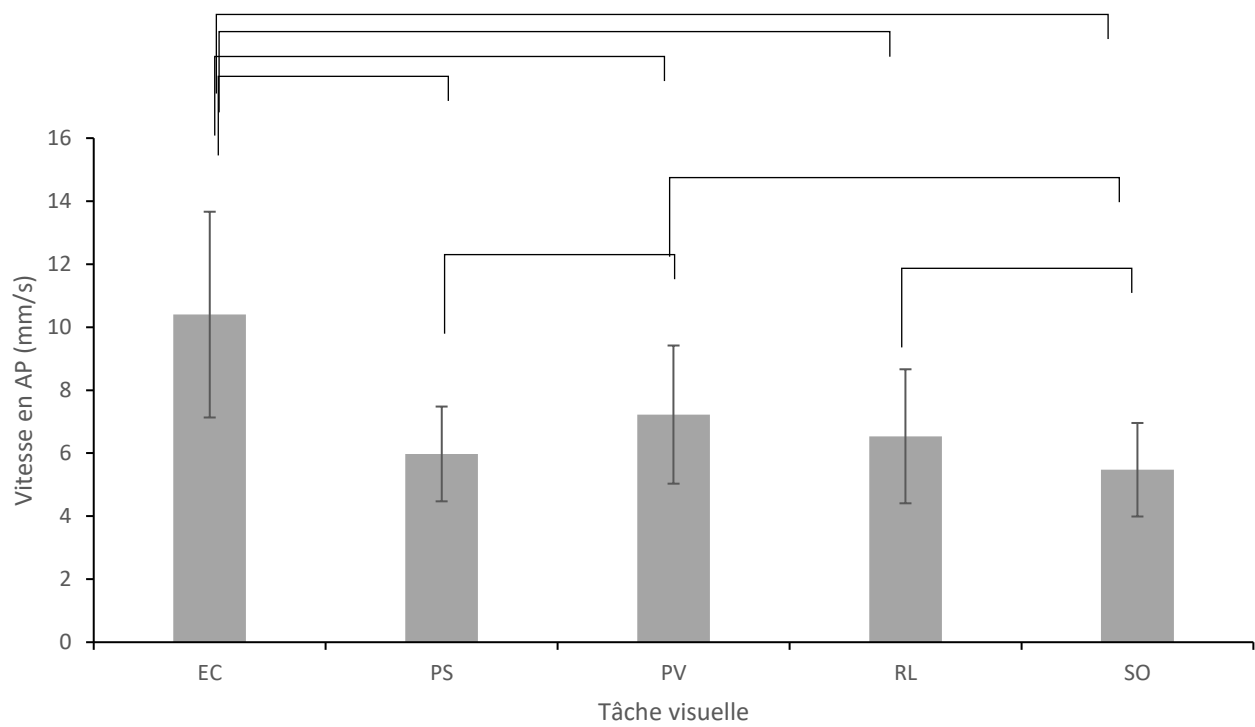


Figure 4. Moyennes et écarts-type de la vitesse de déplacement du CdP (mm/s) en antéro-postérieur pour les cinq tâches visuelles avec barres de signification ($p < .05$).

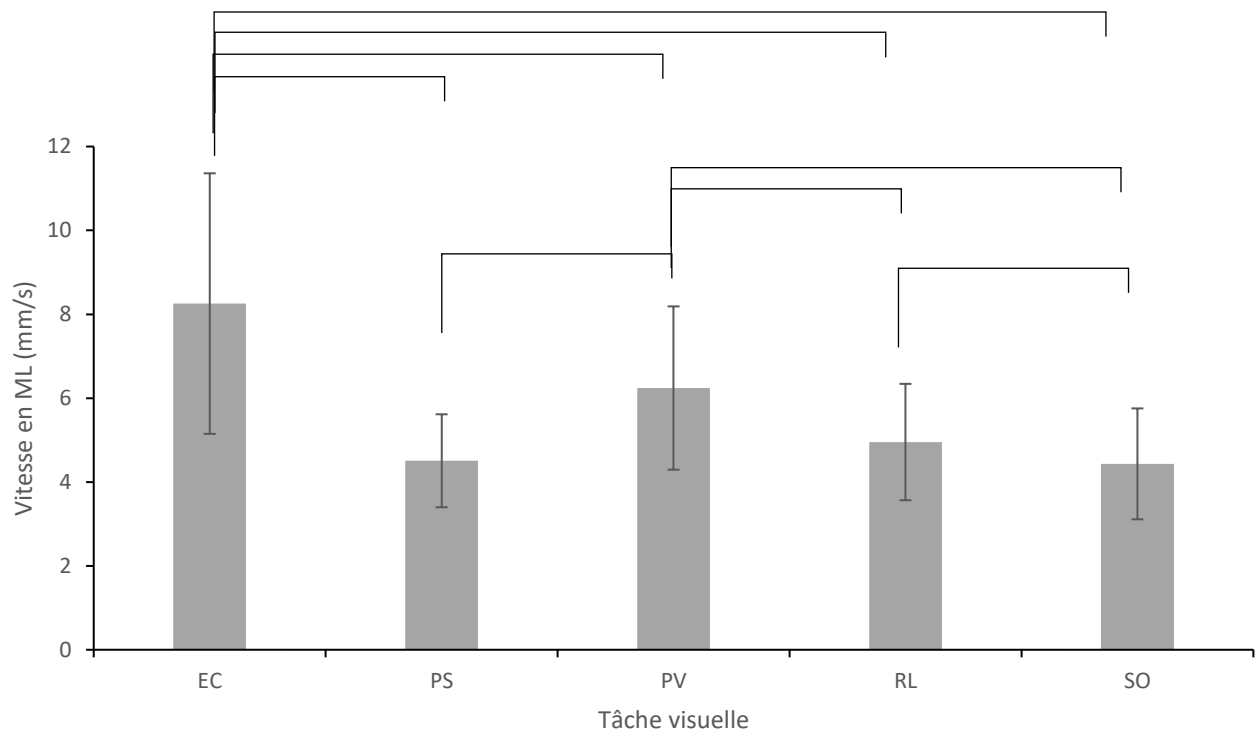


Figure 5. Moyennes et écarts-type de la vitesse de déplacement du CdP (mm/s) en médio-latéral pour les cinq tâches visuelles avec barres de signification ($p < .05$).

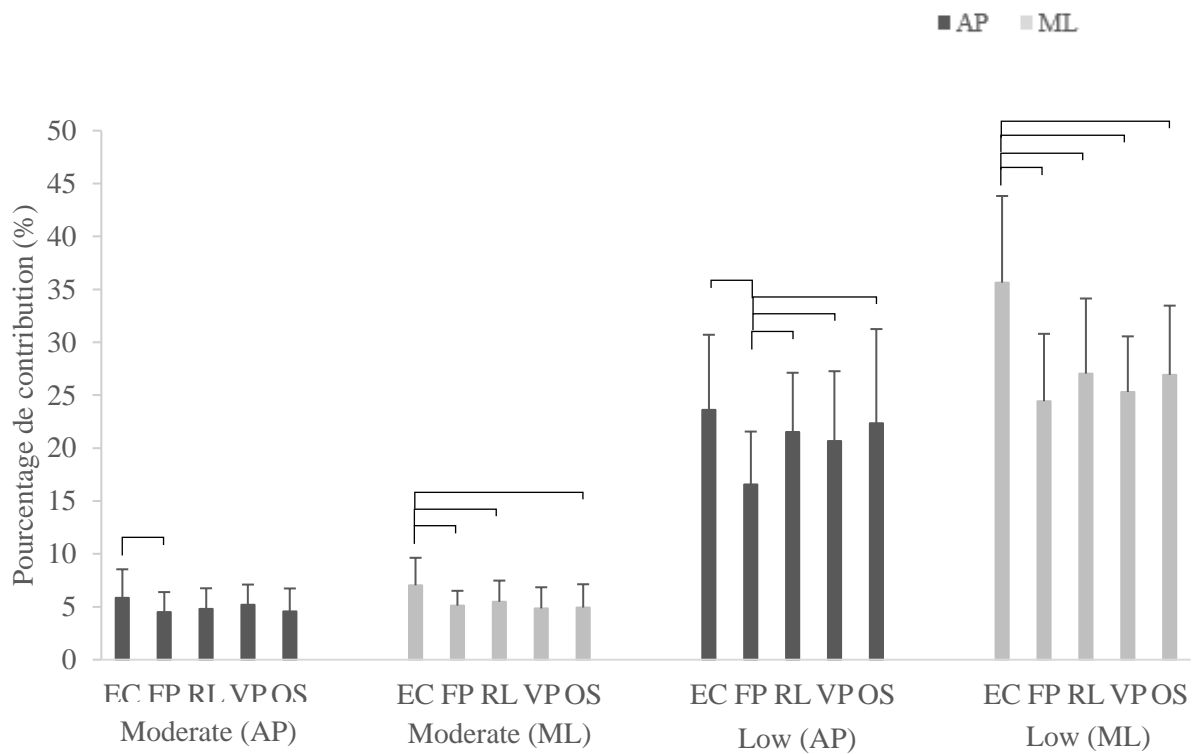


Figure 6. Moyennes et écarts-type des bandes Moderate et Low de la transformation par ondelettes dans les deux directions (AP and ML) pour les cinq tâches visuelles avec barres de signification ($p < .05$).

Appendice A. Transformation par ondelettes

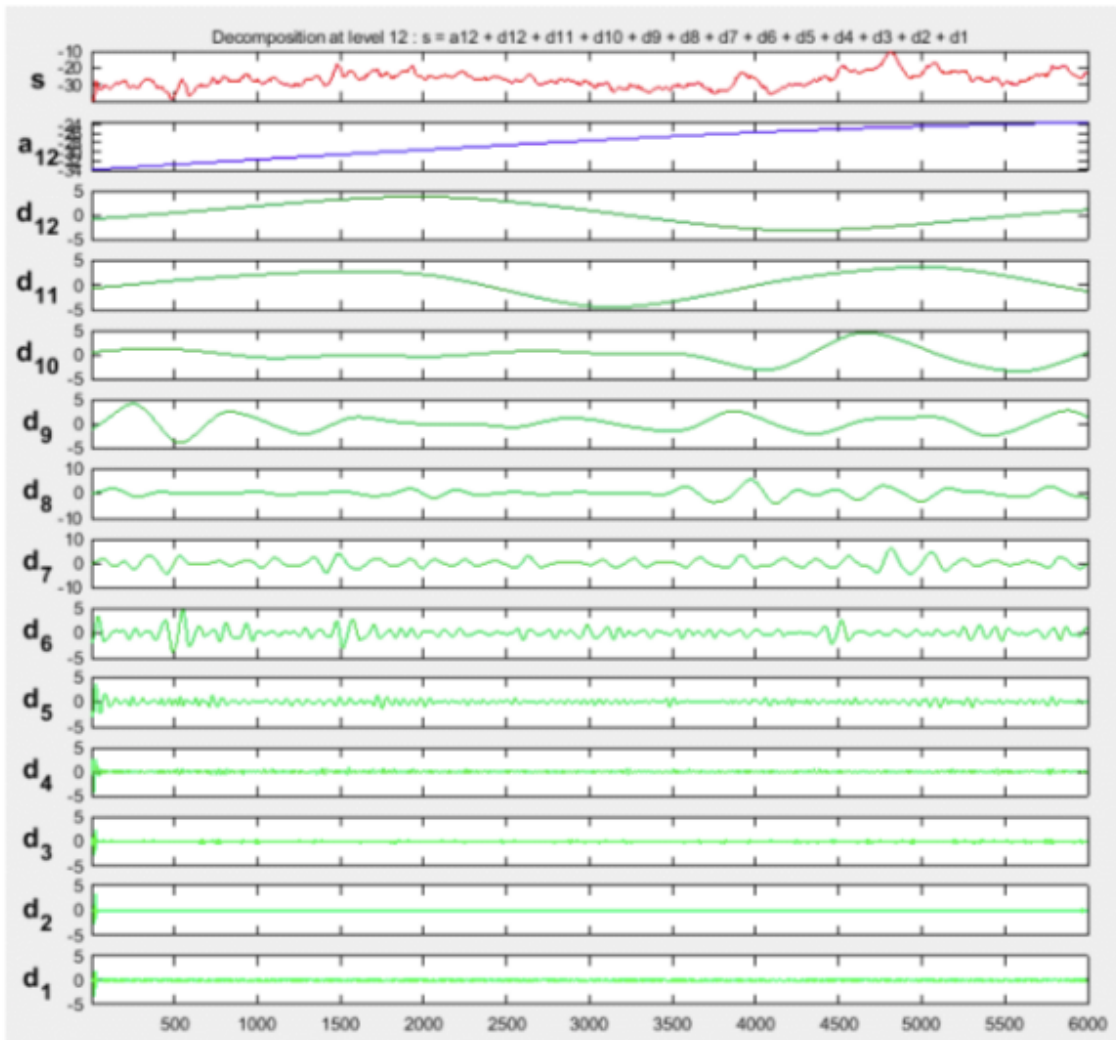


Figure 7. Exemple d'une decomposition à 12 niveau d'un signal de CdP chez un jeune adulte en santé (Figure prise de Richer et Lajoie, 2018a)

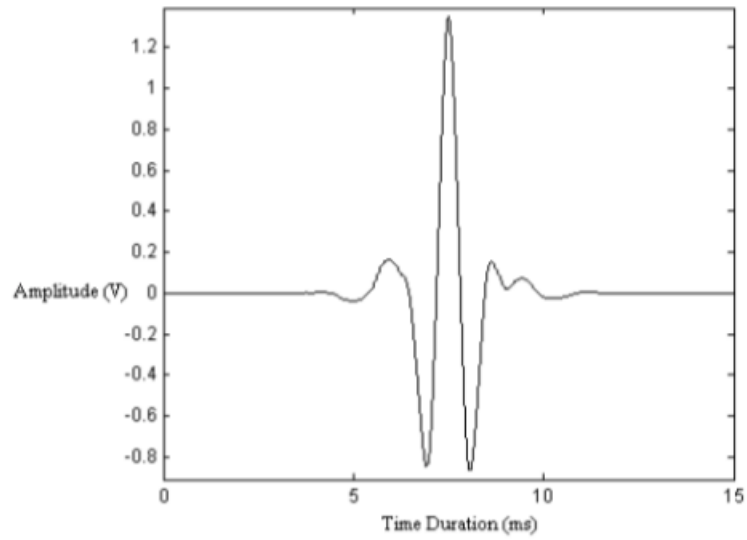


Figure 8. Exemple d'une ondelette Symlet-8 (Hunter et al., 2010)

Tableau 1.

Contenu en fréquence de chaque niveau d'une décomposition (Richer, 2018)

DECOMPOSITION LEVEL	FREQUENCY RANGE (HZ)
1	50.0-100
2	25.0-50.0
3	12.5-25.0
4	6.25-12.5
5	3.13-6.25
6	1.56-3.13
7	0.78-1.56
8	0.39-0.78
9	0.19-0.39
10	0.10-0.19
11	0.05-0.10
12	0.02-0.05

Appendice B. Divers

Questionnaire de santé

Numéro d'identification: _____

Âge: _____ Sexe: _____ Taille: _____ Poids: _____

Marchez-vous avec un dispositif d'assistance? Oui Non

Avez-vous bien dormi la nuit précédente ? Oui Non

Avez-vous une prescription optique ? Oui Non

Cochez tout toutes les situations s'appliquant ou s'étant appliqué à vous

Maladie de Parkinson Ostéoporose Sclérose en plaque

Arthrose Arthrite Accident vasculaire cérébral

Crise cardiaque Vertige Hypertension artérielle

Commotion cérébrale Autre _____

Avez-vous eu une blessure ou une intervention chirurgicale aux membres inférieurs ?
Oui Non

Si oui, décrivez :

Cochez les substances consommées dans les 24 dernières heures :

MOUVEMENT DES YEUX, ATTENTION ET CONTRÔLE DE LA POSTURE

Alcool

Cannabis

Caféine

Cochez les médicaments consommés dans les 24 dernières heures :

Médicaments pour le rhume

Médicaments pour la grippe

Médicament pour les allergies (antihistaminiques)

Antis inflammatoires

Écrivez la liste du/des médicaments et leur but si non présents dans la liste précédente:

Pratiquez vous une activité physique ? Oui

Non

Si oui, quel type?

Quelle est votre niveau de performance? (ex. Amateur, Élite)

Environ combien de fois par semaine ?

30/06/2021

Université d'Ottawa

Bureau d'éthique et d'intégrité de la recherche

University of Ottawa

Office of Research Ethics and Integrity

CERTIFICAT D'APPROBATION ÉTHIQUE | CERTIFICATE OF ETHICS APPROVAL

Numéro du dossier / Ethics File Number	H-06-21-6915
Titre du projet / Project Title	Effet du mouvement oculaire sur le contrôle postural chez les jeunes adultes en santé
Type de projet / Project Type	Thèse de maîtrise / Master's thesis
Statut du projet / Project Status	Approuvé / Approved
Date d'approbation (jj/mm/aaaa) / Approval Date (dd/mm/yyyy)	30/06/2021
Date d'expiration (jj/mm/aaaa) / Expiry Date (dd/mm/yyyy)	29/06/2022

Équipe de recherche / Research Team

Chercheur / Researcher	Affiliation	Role
David LAFLEUR	École des sciences de l'activité physique / School of Human Kinetics	Chercheur Principal / Principal Investigator
Yves LAJOIE	École des sciences de l'activité physique / School of Human Kinetics	Superviseur / Supervisor

Conditions spéciales ou commentaires / Special conditions or comments